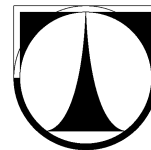




TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

FAKULTA STROJNÍ

Katedra materiálu



Obor: Materiály a technologie

Zaměření: Materiálové inženýrství

**NEDESTRUKTIVNÍ MĚŘENÍ HLOUBKY A TVRDOSTI
POVRCHOVĚ KALENÝCH VRSTEV**

**NON-DESTRUCTIVE MEASUREMENT OF DEPTH
AND HARDNESS OF SURFACE HARDENED LAYERS**

Ondřej Růžička

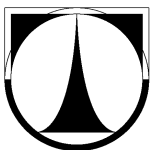
KMT – B – 138

Vedoucí bakalářské práce: doc. Ing. Břetislav Skrbek, CSc.

Rozsah práce a příloh:

Počet stran:	67
Počet obrázků:	51
Počet tabulek:	9
Počet grafů:	1
Počet příloh:	7

V Liberci, 23.května 2008



ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Jméno a příjmení	Ondřej R Ů Ž I Č K A
studijní program	B2341 Strojírenství
obor	3911 R 018 Materiály a technologie
zaměření	Materiálové inženýrství

Ve smyslu zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách se Vám určuje bakalářská práce na téma:

Nedestruktivní měření hloubky a tvrdosti povrchově kalených vrstev

Zásady pro vypracování:

(uveďte hlavní cíle bakalářské práce a doporučené metody pro vypracování)

1. Seznamte se s technickou dokumentací kalených součástí, s jejich strukturou - kalených vrstev, přechodových zón a výchozího stavu.
2. Proveďte rešerži používaných destruktivních a NDT metod stanovení hloubky a tvrdosti prokalení.
3. Navrhněte a ověřte podmínky pro NDT metodiku měření hloubky a tvrdosti konkrétních povrchově kalených součástí. Přesnost a reprodukovatelnost NDT metody.

Forma zpracování bakalářské práce:

- průvodní zpráva v rozsahu 25 - 40 stran

- přílohy

Seznam literatury (uved'te doporučenou odbornou literaturu):

- [1] Jech, J.: Tepelné zpracování ocelí. SNTL Praha 1977.
- [2] Věchet, M. a kol.: Defektoskopie v otázkách a odpovědích. SNTL Praha 1989.
- [3] Skrbek, B. :Publikace – výběr k zadání BP

Vedoucí bakalářské práce:

doc.Ing. Břetislav Skrbek,CSc.

Konzultant bakalářské práce :

L.S.

doc. Ing. František STUHLÍK,CSc.
vedoucí katedry

prof. Ing. Petr LOUDA, CSc.
děkan

V Liberci dne 31.10. 2007

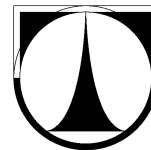
Platnost zadání diplomové práce je 15 měsíců od výše uvedeného data (v uvedené lhůtě je třeba podat přihlášku ke SZZ) .Termíny odevzdání diplomové práce jsou určeny pro každý studijní rok a jsou uvedeny v harmonogramu výuky.



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

FAKULTA STROJNÍ

Katedra materiálu



ANOTACE

OBOR:	Materiály a technologie
ZAMĚŘENÍ:	Materiálové inženýrství
AUTOR:	Ondřej Růžička
TÉMA PRÁCE:	Nedestruktivní měření hloubky a tvrdosti povrchově kalených vrstev
ČÍSLO PRÁCE:	KMT – B – 138
VEDOUcí PRÁCE:	doc. Ing. Břetislav Skrbek, CSc.

Tato bakalářská práce je zaměřena na problematiku nedestruktivních metod měření hloubek a tvrdostí povrchově kalených vrstev. Jsou zde provedeny návrhy těchto metod přímo pro charakteristické strojní součásti jako je vačková hřídel nebo kliková hřídel. Byly zde využity principy ultrazvukového a magnetického nedestruktivního měření.

Klíčová slova:

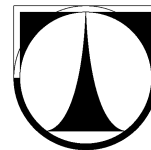
nedestruktivní zkoušení, povrchové kalení, měření tvrdosti, hloubka zakalení, ultrazvuk, magnetické metody



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

FAKULTA STROJNÍ

Katedra materiálu



ANNOTATION

SPECIALIZATION:	Materials and technologies
FOCUSING:	Material engineering
AUTHOR:	Ondřej Růžička
SUBJECT OF THE WORK:	Non-destructive measurement of depth and hardness of surface hardened layers
NUMBER OF THE THESIS:	KMT – B – 138
LEADER OF THE WORK:	doc. Ing. Břetislav Skrbek, CSc.

This bachelor's work is focused on problems of non-destructive methods of measurement of depth and hardness of surface hardened layers. There are performed proposals of these methods for characteristic machine components like camshaft or crankshaft. There were used principles of ultrasonic and magnetic non-destructive measurement.

Keywords:

non-destructive testing, surface hardening, hardness measurement, depth of hardening, ultrasound, magnetic methods

Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé bakalářské práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li bakalářskou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím bakalářské práce a konzultantem.

Datum

Podpis

Poděkování

Chtěl bych poděkovat především panu doc. Ing. Břetislavu Skrbkovi, CSc. za odborné vedení a rady týkající se mé bakalářské práce. Velmi také děkuji Ing. Jaroslavu Smejkalovi ze společnosti Testima spol. s r. o. za propůjčení ultrazvukové měřicí sestavy. Dále bych rád poděkoval Vlastě Čílové, Ing. Adamovi Hotařovi, Ph.D. a Ing. Václavu Kubičkovi, za pomoc při metalografických rozborech.

Ondřej Růžička

Obsah:

Obsah	7
Použité zkratky a symboly	9
1. Úvod	11
2. Cíle práce	11
3. Teoretická část	11
3.1. Kalení	11
3.1.1. Princip kalení	11
3.1.2. Teploty kalení	12
3.1.3. Struktura po kalení	12
3.1.4. Druhy kalení	17
3.1.5. Ochlazovací prostředí	19
3.1.6. Technická dokumentace kalených součástí	20
3.2. Povrchové kalení	21
3.2.1. Princip povrchového kalení	21
3.2.2. Druhy povrchového kalení	21
3.3. Měření tvrdosti a hloubky prokalení u povrchově kalených součástí	24
3.3.1. Běžné zkoušky měření tvrdosti	24
3.3.2. Běžné zkoušky měření hloubky zakalených vrstev	27
3.3.3. Nedestruktivní zkoušky měření tvrdosti	30
3.3.4. Nedestruktivní zkoušky měření hloubky zakalených vrstev	33
4. Praktická část	40
4.1. NDT strukturoskopie vačkové hřídele motoru TEDOM	40
4.1.1. Metalografický rozbor materiálu vačkové hřídele.....	41
4.1.2. Návrh ultrazvukové metody měření hloubky zakalené vrstvy vačkové hřídele	45
4.1.3. Měření vačkové hřídele pomocí měřicího zařízení USLT 2000	47
4.1.4. Měření gradientu tvrdosti vačkové hřídele napříč zakalenou vrstvou	49

4.1.5. Návrh nedestruktivního měření tvrdosti a vliv šířky zakalené vrstvy vačkové hřídele	50
4.1.6. Vlastní vyhodnocení měření tvrdosti vačkové hřídele motoru TEDOM	52
4.2. NDT strukturoskopie klikového hřídele automobilu ŠKODA	52
4.2.1. Metalografický rozbor materiálu klikové hřídele ŠKODA	52
4.2.2. Návrh ultrazvukové metody měření	54
4.2.3. Měření klikové hřídele pomocí měřicího zařízení USLT 2000	55
4.3. NDT strukturoskopie klikového hřídele automobilu TEDOM	56
4.3.1. Metalografický rozbor materiálu klikové hřídele TEDOM	56
4.3.2. Návrh metody měření hloubky zakalení klikové hřídele TEDOM	58
4.3.3. Měření klikové hřídele TEDOM pomocí přístroje DOMENA B3	58
4.4. NDT strukturoskopie přírubových hřídelí a nábojů kola z automobilu VOLKSWAGEN.....	59
4.4.1. Metalografický rozbor materiálu přírubové hřídele a nábojů kola z automobilu Volkswagen	60
4.4.2. Návrh metody měření hloubky zakalení přírubové hřídele a nábojů kola	62
4.4.3. Vlastní měření přírubové hřídele a nábojů kola pomocí přístroje DOMENA B3	62
5. Diskuze	64
6. Závěr	66
Použitá literatura	67
Seznam příloh	67

Použité zkratky a symboly:

NDT zkoušení	-	Nedestruktivní zkoušení	
IRA	-	Izotermický rozpad austenitu	
ARA	-	Anizotermický rozpad austenitu	
M _S	-	Martenzit start	
M _f	-	Martenzit finish	
UCI	-	Ultrasonic Contact Impedance	
TIV	-	Through Indenter Viewing	
TOF	-	The time of flight – Čas letu	
EHT	-	Effective Hardening Thickness	
LKG	-	Litina s kuličkovým grafitem	
q	-	Odvedená energie	[W·m ⁻²]
T	-	Teplota	[°C]
s	-	Hloubka prohřáté vrstvy	[m]
f	-	Frekvence střídavého proudu	[Hz]
μ	-	Permeabilita	[H·m ⁻¹]
σ	-	Měrná elektrická vodivost	[A ² ·s ³ ·kg ⁻¹ ·m ⁻³].
HMa	-	Tvrдость dle Martense	[1]
HR	-	Tvrдость dle Rockwella	[1]
HV	-	Tvrдость dle Vickerse	[1]
HK	-	Tvrдость dle Knoopu	[1]
HSh	-	Tvrдость dle Shoreho	[1]
F	-	Zátěžná síla	[N]
A	-	Plocha vtisku	[mm ²]
D	-	Průměr kuličky	[mm]
d	-	Průměr vtisku	[mm]
F ₀	-	Předběžná síla	[N]
F ₁	-	Přídavné zatížení	[N]
l	-	Delší úhlopříčka vtisku	[mm]
u	-	Úhlopříčka vtisku	[mm]
h	-	Hloubka prokalení	[mm]
D ₀	-	Prokalitelný průměr	[mm]

Δf	-	Změna frekvence kmitání	[Hz]
E	-	Modul pružnosti měřeného materiálu	[MPa]
A_1	-	Plocha vpichu	[mm]
H_p	-	Intenzita magnetického pole budící cívky	[A·m ⁻¹]
I_b	-	Budící proud	[A]
H_s	-	Intenzita mag. pole vířivých proudů	[A·m ⁻¹]
H	-	Intenzita mag. pole na povrchu tělesa	[A·m ⁻¹]
E_s	-	Snímané napětí	[V]
μ_0	-	Permeabilita vakua	[H·m ⁻¹]
μ_r	-	Relativní permeabilita	[H·m ⁻¹]
r_0	-	Poloměr zkoušeného tělesa	[m]
α	-	Úhel dopadu v prostředí 1	[rad]
β	-	Úhel odrazu z prostředí 1 do prostředí 2	[rad]
c_1	-	Rychlost dopadu vlny	[m·s ⁻¹]
c_2	-	Rychlost odrazu vlny	[m·s ⁻¹]
M	-	Hodnota magnetismu	[A·m ⁻¹]

1. Úvod

Nedestruktivní metody zkoušení se v dnešní době velmi rychle rozvíjí. Je kladen čím dál tím větší nárok na co nejmenší ovlivnění zkoušeného materiálu při zkoušce. Je třeba správně volit druh NDT zkoušky, neboť ne všechny zkoušky se hodí pro právě zkoušený materiál. Tento text by měl nastínit problematiku nedestruktivního měření hloubek a tvrdostí povrchově kalených vrstev.

2. Cíle práce

Jak již název mé bakalářské práce napovídá, následující text je zaměřen na nedestruktivní měření hloubky a tvrdosti povrchově kalených vrstev. Rád bych zaměřil na aplikaci nedestruktivních metod zkoušení přímo na charakteristické typy strojních součástí. V podnikové praxi bývá totiž velmi často zvykem používat běžné destruktivní metody měření. Ty jsou ale velmi nevýhodné v případech, kdy se musí například před rozjetím hromadného kalení ověřovat správná hloubka prokalení destruktivně řezem zkušební součásti. Proto je vhodné zvolit nedestruktivní zkoušení. Principy NDT zkoušení jsou různé a z důvodu různorodosti použitého materiálu součásti je třeba správně zvolit metodu.

3. Teoretická část

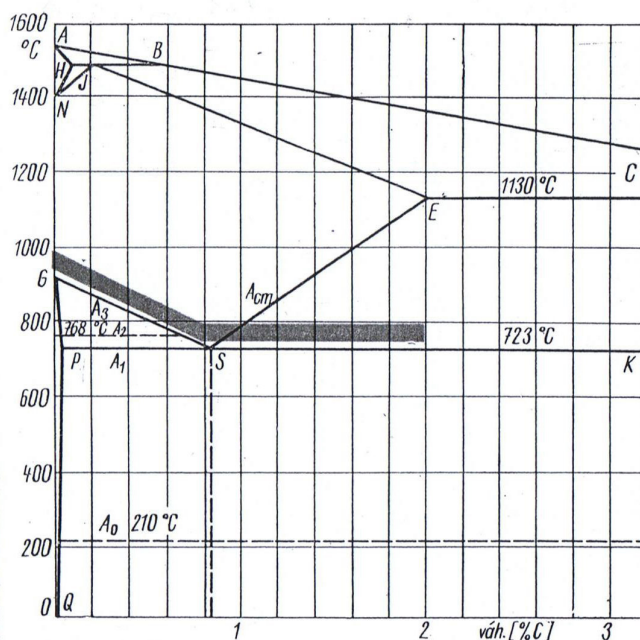
3.1. Kalení

3.1.1. Princip kalení

Kalení je jeden z nejvýznamnějších výkonů tepelného zpracování kovů. Je to v podstatě ohřev oceli těsně nad překrystalizační teploty a poté tak rychlé ochlazení, aby překrystalizace nenastala buď vůbec, nebo jen z části. Dosahujeme zvýšení tvrdosti, ale současně i snížení houževnatosti oceli. /1/

3.1.2. Teploty kalení

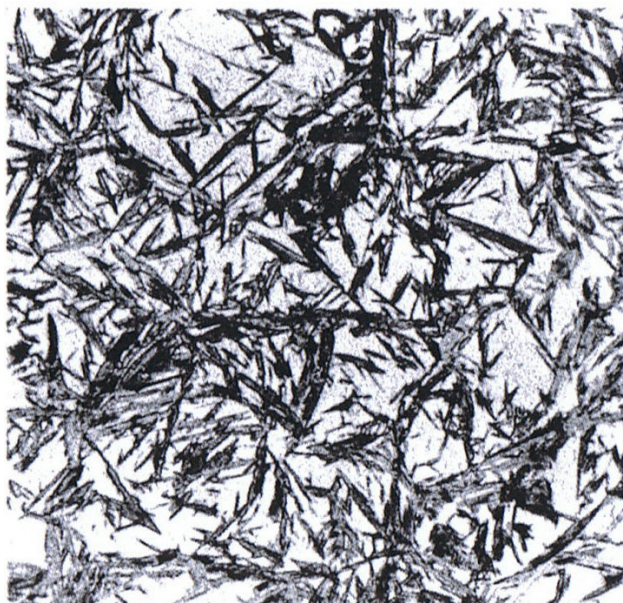
Pásmo kalících teplot je možné vidět na obrázku č. 1. U podeutektoidních ocelí se kalící teploty pohybují v rozmezí 30 až 50 °C nad A_{C3} a u nadeutektoidních ocelí je to 30 až 50 °C nad A_{C1} . /3/



Obrázek č. 1 – Pásmo kalících teplot u uhlíkové oceli /1/

3.1.3. Struktura po kalení

Jak již bylo řečeno, principem kalení je rychlé ochlazení z teploty kalení. Pokud tedy rychle ochladíme, dosáhneme toho, že některé strukturní součásti, jejichž rovnovážná existence je možná pouze za vyšších teplot, se uchovávají při obyčejných nízkých teplotách. U čistého železa nelze udržet za obyčejné teploty jinou modifikaci než α . I ve slitině s uhlíkem dochází vždy k přeměně modifikace železa γ na modifikaci železa α . Prudkým ochlazením z kalící teploty můžeme tedy dosáhnout toho, že se austenit nerozpadne na perlit, ale i přes přeměnu na železo α zůstane uhlík v tuhém roztoku v železe α . Vzniká nová strukturní součást s velkou tvrdostí. Ta se nazývá podle zakladatele moderní metalografie Martense – martenzit. Je to přesycený tuhý roztok uhlíku v železe α . /2/



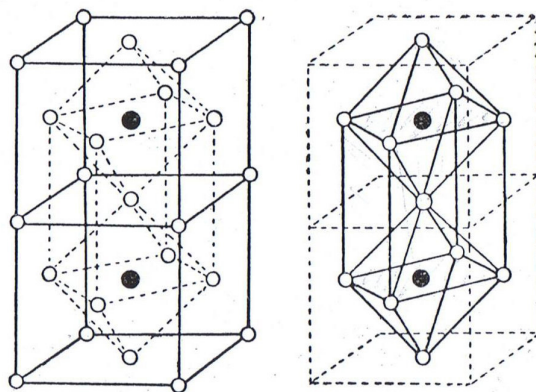
Obrázek č. 2 – Martenzit s austenitem /6/

Na obrázku č. 2 je vidět 800x zvětšená struktura kalené nadeutektoidní ocele. Je zde patrný charakteristický tvar martenzitu – jehlice. Světlejší místa zachycují zbytkový austenit. /6/

Po kalení může být zbytkové množství austenitu 5 až 30 %. Množství zbytkového austenitu závisí na chemickém složení oceli a podmínkách ochlazování. Zbytkový austenit nám negativně ovlivňuje tvrdost, zvyšuje houževnatost, ale zapříčiňuje také změnu rozměrů. Proto se snažíme toto procentuální množství austenitu snížit na minimum. K tomu se především využívá kalení se zmrazováním. /3/

Detailní znázornění vzniku martenzitu při rozpadu austenitu

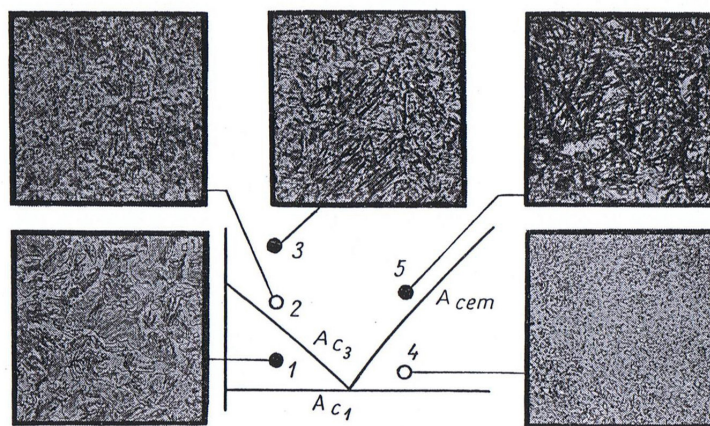
Znázornění rozpadu austenitu na martenzit je velmi pěkně vykresleno na obrázku č. 3. V krychlové mřížce u železa γ je atom uhlíku vázán ve středu. Při přeměně na martenzit se železo γ snaží přeměnit na železo α , ale uhlík zůstává v mřížce upoután a zabrání vzniku této modifikace železa α . Vzniká nový útvar - martenzit, který nemá mřížku krychlovou, ale tetragonální. /2/



Obrázek č. 3 – Znázornění vzniku martenzitu při rozpadu austenitu /2/

Vliv kalicí teploty na strukturu

Správná volba kalicí teploty velmi ovlivňuje výslednou strukturu. Na obrázku č. 4 jsou vyobrazeny struktury, které vznikly volbou různých kalických teplot. Je patrné, že vhodné zvolení teploty kalení velmi ovlivňuje i mechanické vlastnosti kalené součásti.



Obrázek č. 4 – Význam správné kalicí teploty

Vzorek 1, což je podeutektoidní ocel, byl kalen pod teplotou A_{c3} , tedy za teploty nižší, než je pásmo kalících teplot pro uhlíkové oceli. Je zde obsažen volný ferit. U vzorku 2 byla kalicí teplota zvolena správně. Je zde pouze samotný martenzit se zbytkovým austenitem. Vzorek 3 byl kalen za vysoké teploty a obsahuje hrubý křehký martenzit. Vzorek 4 je nadeutektoidní ocel a volba teploty kalení byla správná. Vzorek 5 byl kalen za vysoké teploty a má v hrubém martenzitu velký obsah zbytkového austenitu. /2/

Vliv rychlosti ochlazování na strukturu

Rychlost ochlazování také velmi ovlivňuje výslednou strukturu po kalení. Jak již bylo řečeno, při rychlém ochlazování se tvoří martenzit. Pokud ale není rychlost ochlazování dostatečně vysoká, vznikají struktury, jež mají vlastnosti mezi martenzitem a perlitem. /2/

Vliv teploty a času na průběh přeměny austenitu

Mezi vznikem martenzitu jako nestabilní struktury při nejvyšší rychlosti ochlazování a vznikem stabilní struktury perlitu za nejnižší rychlosti ochlazování, jsou různé druhy přechodových struktur. Protože mají tyto přechodové struktury rozdílné mechanické vlastnosti, je vztah mezi časem a teplotou při rozpadu austenitu velmi důležitý.

Rozpad austenitu je možno provést dvěma způsoby. První z nich je rychlé ochlazení oceli pod A_{C1} a dlouhá izotermická výdrž a poté ochlazení. Tento průběh zachycuje tzv. IRA diagram. Zkratka IRA značí izotermický rozpad austenitu. Druhý princip rozpadu austenitu je plynulé ochlazování na teplotu místnosti. Jedná se o anizotermický rozpad austenitu, který znázorňuje diagram ARA. V technické praxi jsou běžnější ARA diagramy než IRA diagramy. /2/

V obou diagramech mají asi největší význam křivky M_s a M_f . Jedná se o počátek a konec martenzitické přeměny. Některé prvky obsažené v oceli teplotu M_s posouvají. Chrom, molybden, mangan nebo nikl snižují tuto teplotu a například hliník nebo kobalt tuto teplotu zvyšují. /3/

Na obrázku č. 5 je možno vidět ARA diagram eutektoidní oceli. Jak již bylo řečeno, diagramy ARA udávají počátky a konce jednotlivých přeměn při plynulém ochlazování austenitu různou rychlostí. /3/

Výsledné struktury vznikající za různých ochlazovacích rychlostí jsou znázorněné na obrázku č. 5 a můžeme si o nich říci něco více.

Křivka ochlazování 1 a 2 zachycuje perlitickou přeměnu. Počátek a konec přeměny je posunutý k nižším teplotám tím více, čím je větší ochlazovací rychlost.

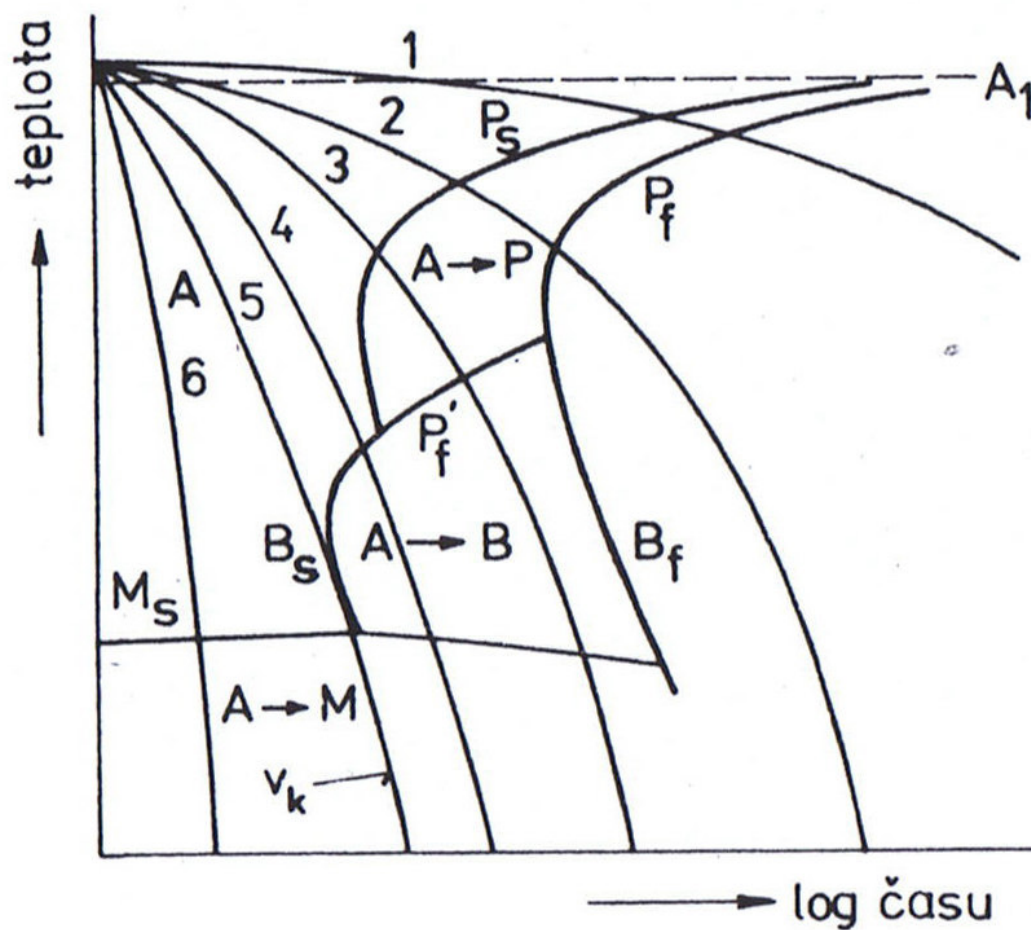
Křivka ochlazování 3 ukazuje to, že při takovémto ochlazování začíná vznikat ve struktuře společně s perlitem také bainit a martenzit.

Již samostatnou bainitickou přeměnu zachycuje křivka ochlazování 4. Při překročení M_s začíná také ve struktuře vznikat martenzit. Samostatnou martenzitickou přeměnu znázorňuje křivka ochlazování 5. Tato ochlazovací rychlost je nazývána kritická rychlost martenzitické

přeměny. Jedná se o nejmenší rychlost ochlazování, kdy je výsledná struktura tvořena jen martenzitem a v menším množství také zbytkovým austenitem.

Ochlazovací křivka 6 je již běžně používaná křivka nepřerušovaného kalení do studené lázně.

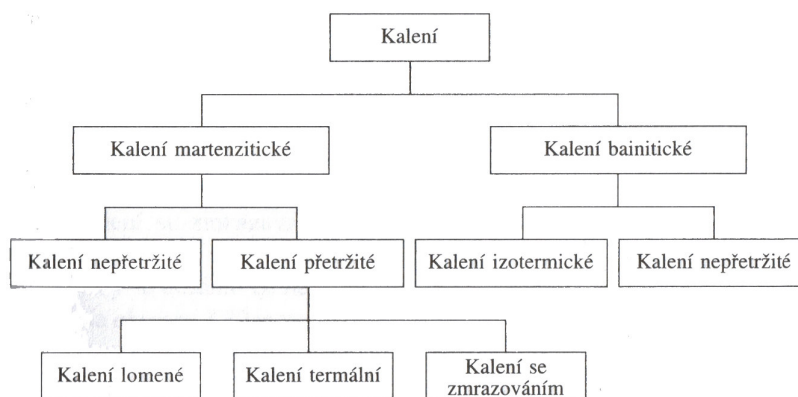
/6/



Obrázek č. 5 – Anizotermický rozpad austenitu eutektoidní oceli /6/

3.1.4. Druhy kalení

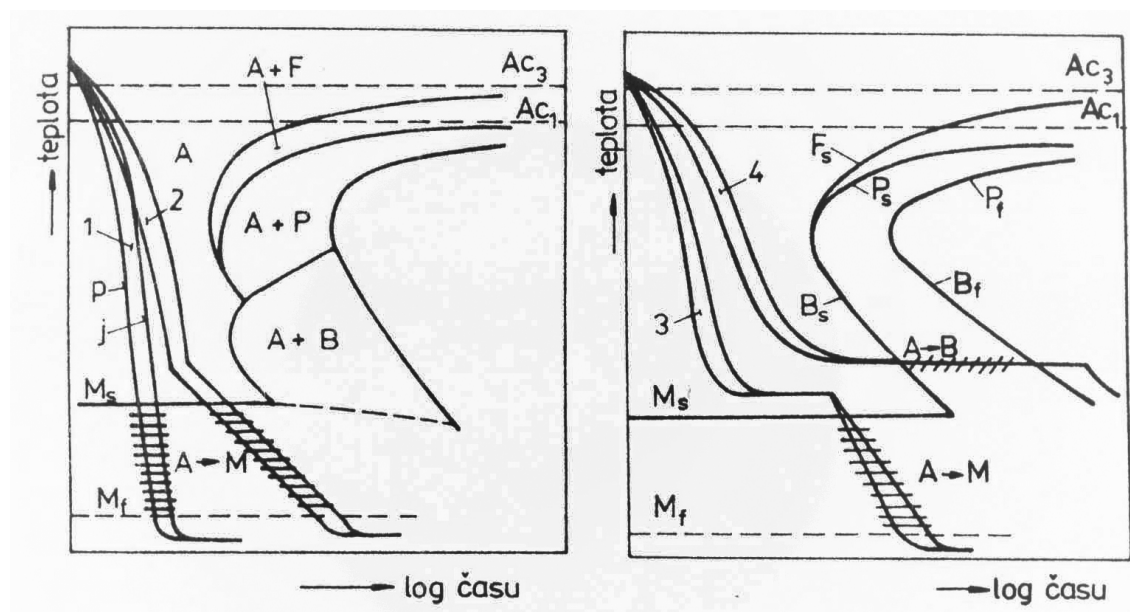
Jako nejjednodušší rozdělení druhů kalení se jeví kalení martenzitické, nebo kalení bainitické, dle obrázku č. 6. Dnes již převažuje kalení martenzitické, neboť má martenzit vyšší tvrdost než bainit. Martenzitickou strukturu lze také poté popouštět, čímž můžeme ještě zvýšit tvrdost nebo houževnatost, podle toho jaký druh popouštění vybereme. /1/



Obrázek č. 6 – Druhy kalení /9/

Kalení martenzitické

Nejjednodušší druhy kalení jsou zachyceny na obrázku č. 7.



Obrázek č. 7 – Druhy kalení – 1 – základní kalení, 2 – lomené kalení, 3 – termální kalení, 4 – izotermické kalení, p – povrch, j – jádro /6/

Mezi martenzitické kalení můžeme považovat takové kalení, po kterém vznikne ve struktuře martenzit v převažujícím množství.

Základní kalení je někdy také nazýváno kalení do studené lázně. Je to nejjednodušší způsob kalení, při kterém však vzniká největší pnutí.

Abychom snížili vnitřní pnutí, používáme kalení přerušované lomené. Jedná se o změnu intenzity ochlazení při přechodu přes M_s . Po přechodu přes tuto hranici je již intenzita ochlazování nižší. Právě díky této změně intenzity ochlazování dojde ke snížení vnitřního pnutí.

Termální kalení je způsob tepelného zpracování, při kterém z kalící teploty rychle ochladíme nad M_s . Poté následuje prodleva, která zapříčiní to, že se teploty jádra a povrchu srovnají. Nejčastěji bývá tato prodleva realizována vyrovnáním teplot lázně a součásti. Prodleva nesmí být zase příliš dlouhá, aby nedošlo k překročení začátku bainitické přeměny. Poté následuje ochlazení na vzduchu. /3/

Kalení bainitické

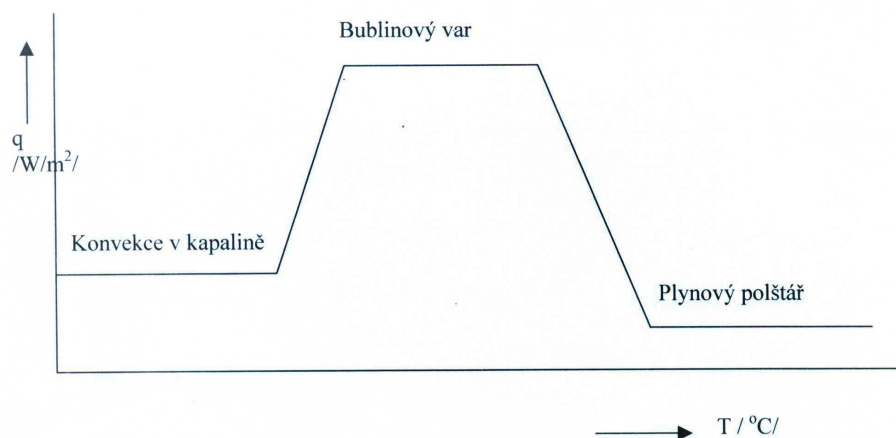
Jako nejpoužívanější bainitické kalení se jeví kalení izotermické. Je to způsob kalení odvozený ze znalosti IRA diagramu. Dochází zde k rozpadu austenitu na bainit. Kalená součást se zakalí v horké lázni. Vyčká se, než se teploty lázně a součásti vyrovnají, a než proběhne bainitická přeměna. Poté následuje dochlazení. /1/

3.1.5. Ochlazovací prostředí

Etapy ochlazovacího prostředí

Ochlazovací prostředí, které rychleji odvede teplotu, způsobuje hlubší zakalení. Snaha získat co nejhlubší prokalení může však způsobit vyšší zákalné pnutí a vznik trhlin v součásti. Proto ne vždy je to nejvhodnější ochlazovací prostředí to nejintenzivnější. /2/

Ochlazovací proces se skládá ze tří etap. Na obrázku č. 8 můžeme vidět závislost odvedené energie q na teplotě T .



Obrázek č. 8 – Etapy ochlazovacího procesu /3/

Nejprve se vytvoří plynový polštář, který výrazně zpomaluje odvod tepla. Po dosažení oblasti bublinového varu dochází k nejintenzivnějšímu ochlazování. Ve třetí etapě se teplo odvádí jen vedením v kapalině. /3/

Druhy ochlazovacího media

Voda

Nejznámějším ochlazovacím prostředím je bezkonkurenčně voda. Je to nejintenzivnější ochlazovací medium. Neznamená to ale, že by bylo také nejlepší. Kalící charakteristiky vody jsou poměrně špatné. Dále má voda korozivní účinky a mohou se v ní též tvořit různé řasy a podobně. Velikou výhodou je však její dostupnost a manipulovatelnost. Ekologické hledisko je také poměrně přijatelné. /3/

Olej

Kalení olejem je mnohem méně intenzivní než vodou. Používají se různá aditiva, která snižují dobu tvorby parního polštáře. Je zde třeba ale dát pozor. Důležité je zde kontrolovat bod vzplanutí, viskozitu, obsah vody, rychlost ochlazování nebo kyselost kalícího media. Toto ochlazovací prostředí není moc ekologické, a proto dochází k vývoji nových ochlazovacích medií. /3/

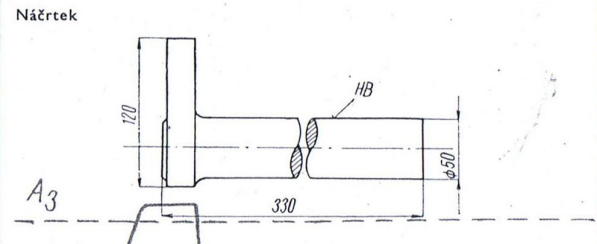
Polymerové kalící lázně

Jsou to roztoky organických polymerů ve vodě. Jsou ekologické, mají velikou pružnost kalících charakteristik a způsobují menší deformace součásti po kalení. To jsou jen některé klady tohoto kalícího prostředí. Rozšíření polymerů do výroby už dnes brání jen výrobní stereotypy podniků. /3/

Plynové kalící prostředí

Jako medium se používá vzduch, stlačený dusík nebo argon. Stlačením a regulací rychlosti proudění lze velmi dobře řídit rychlost ochlazování. Tato metoda je velmi perspektivní. /3/

3.1.6. Technická dokumentace kalených součástí

		Materiál 12 061.1		
		Váha 1 kusu 5,4 kg		
		Předpis požadované jakosti HB 223-269		
		Rozsah zkoušek: 3 %		
Pol.	Operace	Zařízení	Podmínky	Vsázka
1	Kalit	Rotační pec	830 ± 10 °C, 100 min, olej 40–60 °C	60 ks/100 min.
2	Očistit	Strojní pračka		
3	Popustit	Komorová pec	600 ± 20 °C, 140 min, vzduch	120 ks
4	Kontrolovat tvrdost	Diatestor	HB 10/3000/30	3 %
Podobným způsobem se zušlechťují i jiné důležité výkovky a strojní součásti, jako např. ojnice, táhla, vidlice a pod., které je třeba před zušlechťováním zhruba opravit.				

Obrázek č. 9 – Návodka na tepelné zpracování (zušlechťování) kliky z materiálu 12 061.1 /1/

U tepelného zpracování součástí je vždy potřeba přesně dodržovat podmínky potřebné k dosažení požadovaného strukturního složení po tepelném zpracování. K předepsání těchto podmínek slouží návodka na tepelné zpracování. Z obrázku č. 9 lze vyčíst přesné teploty ohřevu kalené součásti a teploty kalícího media, a to včetně tolerancí. Dále jsou zde uvedeny výdrže, požadované tvrdosti a podobně. Velmi důležitou součástí udávající představu o průběhu teplot při tepelném zpracování je digram. /1/

3.2. Povrchové kalení

3.2.1. Princip povrchového kalení

V řadě případů je u strojních součástí vyžadován tvrdý povrch a houževnaté jádro. To je také princip povrchového kalení. Jedná se o velmi rychlý ohřev. Tento obrovský nárůst teploty se vytváří proto, aby se nestihlo prohřát jádro. Poté následuje prudké ochlazení. /2/

3.2.2. Druhy povrchového kalení

Mezi základní druhy povrchového kalení patří:

- Kalení plamenem
- Kalení indukční
- Ponorné kalení
- Laserové povrchové
- Elektronovým paprskem

/3/

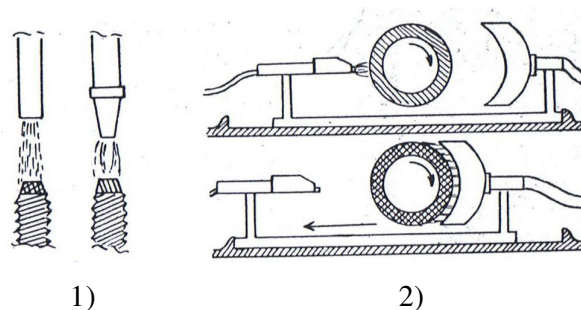
Kalení plamenem

Při tomto způsobu povrchového kalení se používají pro ohřev povrchu plynové hořáky, v nichž se spaluje společně s kyslíkem většinou acetylen nebo svítiplyn. Jestliže je přívod tepla dostatečně intenzivní, dojde k prohřátí povrchu, a poté ihned ke zakalení. K prudkému ochlazení se používá přívod kalícího media nazývaný sprcha.

Druhy kalení plamenem:

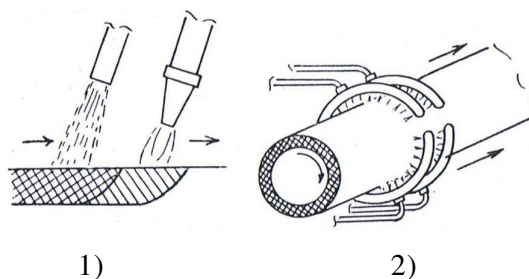
- Přerušované kalení
- Postupné kalení

Na obrázku č. 10 je znázorněno přerušované kalení. Levá polovina obrázku zachycuje kalení čela šroubu. Hořák provede ohřev na kalící teplotu. Poté se odsune a uvede se do činnosti sprcha. V pravé polovině obrázku je znázorněno přerušované kalení za rotace. Kalený předmět se otáčí a hořák ho ohřívá na teplotu kalení. Poté se hořáky odsunou a sprcha ochladí kalený předmět.



Obrázek č. 10 – Přerušované kalení – 1 - kalení čela šroubu, 2 – Přerušované kalení za rotace

Princip postupného kalení je zachycen na obrázku č. 11. Pokud se jedná o rovinnou plochu, hořák se pohybuje nad povrchem a ohřívá ho na kalící teplotu. V závěsu za ním je sprcha, která ohřátý povrch prudce zakalí. U kalení rotační plochy je postup kalení podobný. Rozdíl je jen v přidané rotaci kaleného předmětu. V tomto případě se také nepohybuje kalící souprava, ale dochází k posouvání kaleného předmětu.



Obrázek č. 11 – Postupné kalení – 1 – rovinné plochy, 2 – rotační plochy

Nevýhodou tohoto dnes již poměrně zastaralého principu je opal povrchu. Odpadá také často nepříjemná manipulace se stlačeným plynem. Výhodou však zůstává poměrně jednoduchá konstrukce kalícího zařízení.

/2/

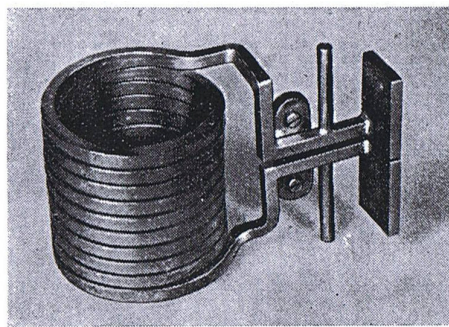
Kalení indukční

Kalený předmět je obklopen vodičem tvaru cívky, který se tohoto předmětu nedotýká. Tento předmět se stává jádrem transformátoru. V něm indukovaný proud se mění na teplo. Je třeba dodržet optimální frekvenci použitého proudu, aby skutečně došlo k ohřevu pouze povrchu. Pro určení vhodné hloubky prohřáté vrstvy stačí tedy správně zvolit frekvenci střídavého proudu. /2/

Platí vztah pro hloubku prohřáté vrstvy dle (1):

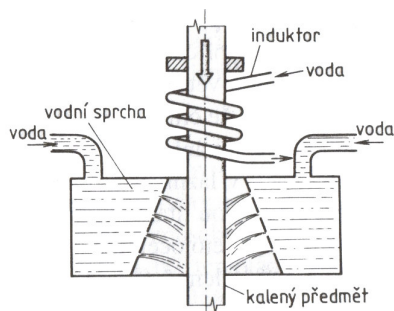
$$s^2 = \frac{1}{\pi \cdot f \cdot \mu \cdot \sigma} \quad (1)$$

kde s je hloubka prohřáté vrstvy [m], f je frekvence střídavého proudu [Hz], μ je permeabilita [$\text{H} \cdot \text{m}^{-1}$] a σ je měrná elektrická vodivost [$\text{A}^2 \cdot \text{s}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{m}^{-3}$]. /4/



Obrázek č. 12 – Induktor

Na obrázku č. 12 je fotografie několika-závitového spirálního induktoru. Induktor je vlastně vodič vysokofrekvenčního proudu upravený do tvaru smyčky s několika závitů. Je zhotoven z měděné trubičky čtvercového nebo kruhového průřezu, kterým proudí chladicí kapalina. /2/



Obrázek č. 13 – Schéma indukčního ohřevu a povrchového kalení /9/

Princip a postup povrchového kalení indukčního je zachycen na obrázku č. 13. Induktor ohřívá kalenou součást, v tomto případě kruhového průřezu. Ta se posouvá a je prudce ochlazována kalícím médiem.

Indukční kalení se jeví jako velmi výhodné a to především proto, že vlivem rychlého ohřevu je okujení kalené součásti malé a nevyžaduje často dalších úprav. Tento princip lze také velmi dobře automatizovat. Hodí se však jen pro sériovou nebo hromadnou výrobu z důvodu vysokých pořizovacích nákladů. /9/

3.3. Měření tvrdosti a hloubky prokalení u povrchově kalených součástí

3.3.1. Běžné zkoušky měření tvrdosti

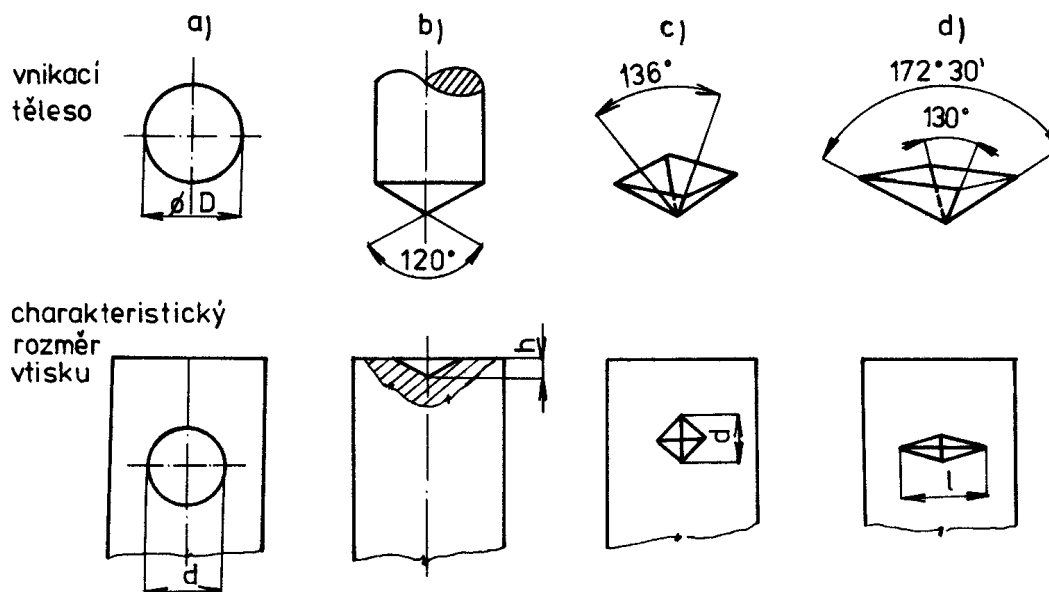
Tvrдость je jedna z nejdůležitějších vlastností materiálu. Je definována jako odpor, který klade materiál proti vnikání cizího tělesa. Hodnoty tvrdosti uvádíme bez jednotek, nebo pokud jsou odvozeny ze vztahu mezi tlakovou silou a plochou vtisku, mají jednotky MPa. Protože by ale mohlo dojít k záměně mezi pevností materiálu, uvádíme ji nejčastěji bez jednotek. Značí se H. Zkoušky tvrdosti rozdělujeme na zkoušky vrypové, vnikací a odrazové. /8/

Zkouška vrypová

Používá se především pro velmi tvrdé a velmi křehké materiály. V technické praxi je nejznámější zkouška dle Martenze. Značíme ji HMa a principem se jedná o přitlačování kuželového diamantového hrotu s vrcholovým úhlem 90° měnitelným tlakem na leštěný povrch zkušebního tělesa předepsanou rychlostí. Jako míra tvrdosti je zde brána síla F potřebná ke vzniku vrypu šířky 0,01 mm. /8/

Zkouška vnikací

Jedná se o nejpoužívanější zkoušku pro měření tvrdosti. Princip je založen na zatlačování zkušebního tělíska do povrchu, u kterého měříme tvrdost. Podle tvaru zkušebního tělíska (viz. obrázek č. 14) rozlišujeme zkoušku dle Brinella, Rockwella, Vickerse a Knoop. /6/



Obrázek č. 14 – Tvary nejčastěji používaných vnikacích těles – a) Brinell, b) Rockwell
c) Vickers, d) Knoop /6/

Brinellova zkouška tvrdosti

Principem jde o vtláčování ocelové kalené kuličky o průměru $D = 10 \text{ mm}$; 5 mm ; $2,5 \text{ mm}$ a 1 mm do zkoušeného materiálu. Ocelová kalená kulička se používá do tvrdosti 450 HB a pro vyšší tvrdost máme kuličku ze slinutých karbidů. Měříme průměr vtisku d (aritmetický průměr dvou na sebe kolmých rozměrů d_1 a d_2), který zůstane po odlehčení zkušebního zatížení F . /8/

Pro určení tvrdosti HB dle Brinella platí výpočtový vztah (2):

$$HB = \frac{0,102F}{A} \quad (2) \quad A = \frac{\pi \cdot D}{2} \left(D - \sqrt{D^2 - d^2} \right) \quad (3)$$

kde F [N] je zátěžná síla a A [mm²] je plocha vtisku. Doba zatížení je mezi 10 až 15 s pro ocel a litiny a 10 – 180 s u neželezných kovů. /5/, /6/

Rockwellova metoda měření tvrdosti

Diamantový kužel s vrcholovým úhlem 120° nebo ocelová kulička o průměru $1/16''$ je nejprve zatížena předběžnou silou F_0 , aby došlo k vyrovnání nerovností povrchu. Poté zatížíme ještě přídavným zatížením F_1 . Odlehčíme na zatížení F_0 a na hloubkoměru odečteme přímo tvrdost v příslušné stupnici. /8/

Vickersova metoda měření tvrdosti

Zkouška spočívá ve vtláčování zkušebního diamantového čtyřbokého jehlanu s vrcholovým úhlem 136° zatížením F po stanovenou dobu. Měříme úhlopříčky vtisku u_1 a u_2 . Celková úhlopříčka u je jejich aritmetickým průměrem. Tvrdost HV dle Vickerse určíme ze vzorce (4):

$$HV = 0,189 \frac{F}{u^2} \quad (4)$$

kde F [N] je zátěžná síla a u [mm] je aritmetický průměr délky úhlopříček vtisku. Zatížení $F = 294 \text{ N}$ a čas zatížení je 10 až 15 s. /5/, /6/

Knoopova zkouška tvrdosti

Vnikacím tělískem je diamantový čtyřboký jehlan s vrcholovými úhly 130° a $172^\circ 30'$. Měří se delší úhlopříčka l . Výsledkem je zjištěná tvrdost HK, jež určíme ze vzorce (5):

$$HK = 1,4509 \cdot \frac{F}{l^2} \quad (5)$$

kde F [N] je zátěžná síla a l [mm] je délka delší úhlopříčky kosočtverce. /5/, /6/

Zkouška odrazová

Tato metoda měření tvrdosti je pouze orientační. Je založena na pružném odrazu závaží spuštěného z určité výšky. Přístroj pro měření tvrdosti pomocí odrazu se nazývá Shoreho skleroskop. Výsledkem této zkoušky je tvrdost HSh odečtená přímo na stupnici skleroskopu.

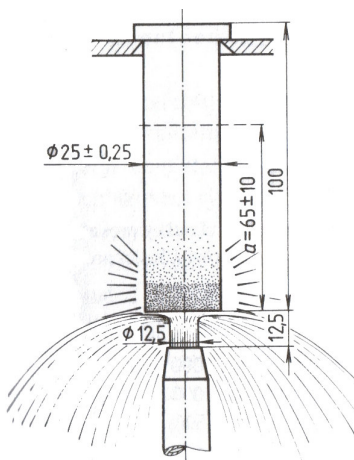
/8/

3.3.2. Běžné zkoušky měření hloubky zakalených vrstev

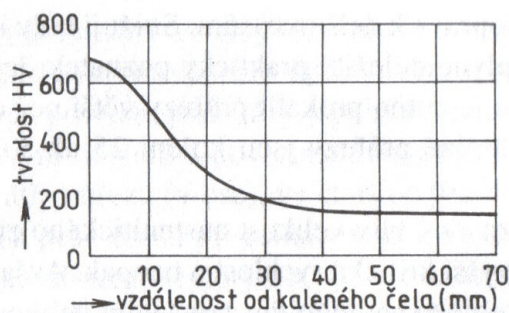
Jako nejběžnější zkouška měření hloubky zakalených vrstev se používá Jominiho čelní zkouška prokalitelnosti. Ještě však před tím, než začneme s popisem samotné zkoušky prokalitelnosti, je třeba definovat, co vlastně prokalitelnost je. *Prokalitelnost* je definována jako schopnost oceli dosáhnout po kalení v určité hloubce pod povrchem tvrdosti odpovídající kalitelnosti dané oceli při 50 % martenzitu ve struktuře. Dalším důležitým pojmem je zakalitelnost. *Zakalitelnost* rozumíme nejvyšší dosažitelnou tvrdost oceli, jež je dána především tvrdostí martenzitu, která se rostoucím procentuálním obsahem uhlíku vzrůstá. /9/

Jominiho čelní zkouška prokalitelnosti

U této zkoušky (obrázek č. 15) se čelo standardního válcového zkušebního vzorku, ohřátého v peci na teplotu kalení, ochlazuje ve speciálním přípravku proudem vody. Co se týká rychlosti ochlazování, ta je největší na čele zkušebního vzorku a s rostoucí vzdáleností od čela plynule klesá. Poté se vybrousí ploška v hloubce 0,4 mm, na níž zjišťujeme tvrdost HV při postupně se zvětšující vzdálenosti od kaleného čela. Vynesením zjištěných tvrdostí a jednotlivých vzdáleností od čela do diagramu a jejich spojením, dostáváme křivku prokalitelnosti viz. obrázek č. 16. /9/

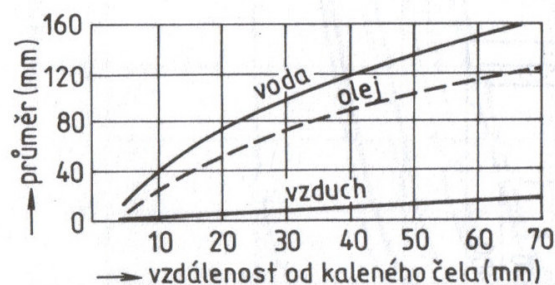


Obrázek č. 15 – Jominiho čelní zkouška prokalitelnosti /9/



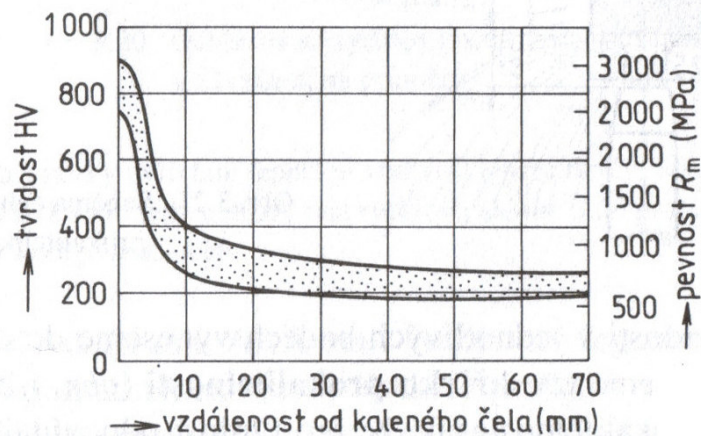
Obrázek č. 16 – Příklad křivky prokalitelnosti /9/

Z křivky prokalitelnosti lze stanovit hloubku prokalitelnosti tak, že při tvrdosti, která odpovídá 50 % martenzitu pro daný obsah uhlíku, odečteme příslušnou vzdálenost od čela. Pokud použijeme diagram na obrázku č. 17, můžeme určit prokalitelný průměr D_0 , který se ještě prokalí. /9/



Obrázek č. 17 – Závislost mezi vzdáleností od čela a prokalitelným průměrem D_0 pro různá kalící prostředí /9/

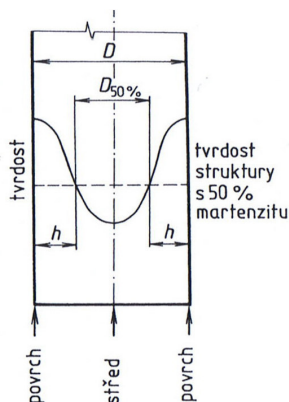
Z důvodu možné nepatrné rozdílnosti v chemickém složení u dané oceli (uhlík může kolísat až 0,1%) bude tato ocel prokalitelná v určitém rozmezí. Na obrázku č. 18 je diagram prokalitelnosti pro ocel 12 060 s tzv. pásem prokalitelnosti, jež právě symbolizuje jisté odchylky od přesně daného chemického složení oceli. /9/



Obrázek č. 18 – Pás prokalitelnosti oceli 12 060 /9/

Jominiho čelní zkouška prokalitelnosti je velmi jednoduchá, a také velmi efektivní metoda zjišťování hloubky zakalení. Nevýhodou je poškození zkoušeného vzorku. Další nevýhodou je její špatná aplikovatelnost na specifické strojní součásti.

Prokalitelnost lze také zjistit tak, že zakalíme válečky z dané oceli různého průměru, které pak napříč rozřízneme a na jejich příčném řezu zjišťujeme průběh tvrdosti. Tento princip je zachycen na obrázku č. 19. /9/



Obrázek č. 19 – Průběh tvrdosti v zakaleném válci, kde h je hloubka prokalení /9/

3.3.3. Nedestruktivní zkoušky měření tvrdosti

U měření povrchové tvrdosti strojních součástí nedestruktivními metodami téměř nedochází k poškození těchto součástí deformací vrypem nebo vtiskem. Mezi základní nedestruktivní metody měření tvrdosti patří metoda UCI, Dynamická metoda a metoda TIV.

Metoda měření tvrdosti UCI

Zkratka UCI znamená Ultrasonic Contact Impedance, což již samo o sobě naznačuje, že se jedná o metodu měření tvrdosti pomocí ultrazvuku. U této ultrazvukové metody se využívá axiálně kmitající tyčka s Vickersovým diamantovým hrotem. Principem se jedná o vtlačování tohoto zkušebního tělíska a zároveň jeho kmitání jak je vidět na obrázku č. 20.



Obrázek č. 20 – Průřez sondou UCI

Kmitání se přenáší na pružinu a ta uvádí do kmitavého pohybu i tyčinku s Vickersovým diamantem. Po zatížení u měřeného materiálu dojde ke změně frekvence kmitu. Tato frekvence závisí na ploše vpichu a na modulu pružnosti měřeného materiálu. Změna frekvence je dána vzorcem (6):

$$\Delta f = E \cdot \sqrt{A_f} \quad (6)$$

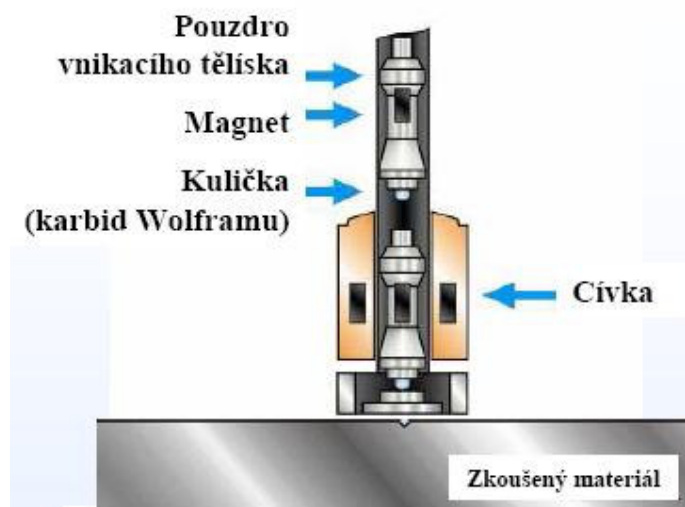
kde Δf [Hz] je právě změna frekvence kmitání, E [MPa] je modul pružnosti měřeného materiálu a A_f [mm] je plocha vpichu.

UCI metoda je vhodná pro velké i malé díly s minimální tloušťkou stěny 2-3mm a minimální hmotnosti 0,3kg. Umožňuje operativní měření a zjišťování tvrdosti vrstev při velmi malých zátěžných silách. Vhodná je také pro těžko přístupná místa měření tvrdosti například na finálních výrobcích, jako jsou lopatky turbín a kompresorů, nebo evolventní plochy ozubených kol. Pro měření velmi malých dílů je třeba upínací stojan. Nevýhodou je jen potřebná kvalitní plocha měření. Přesnost měření se pohybuje při 65 HRC kolem $\pm 1,5$ HRC.

/10/

Dynamická metoda měření tvrdosti

Dynamická metoda je další nedestruktivní metoda měření tvrdosti. Je založena na rozdílu kinetické energie kuličky z karbidu wolframu vystřelené proti povrchu měřeného materiálu a kuličky, která se od tohoto materiálu odrazí. Úbytek energie závisí na tvrdosti materiálu a na modulu pružnosti měřeného materiálu. Na obrázku č. 21 je znázorněn průřez sondou na měření dynamickou metodou. Je zde patrná elektromagnetická indukční cívka, která právě snímá kinetickou energii.



Obrázek č. 21 – Průřez sondou pro měření dynamickou metodou

Tato metoda je vhodná pro měření tvrdosti u hrubozrnných materiálů, litých materiálů a výrobků z oceli zejména větších rozměrů. Minimální požadovaná tloušťka zkoušeného materiálu je zde 10-15 mm, což je poměrně hodně a minimální hmotnost dílu asi 5 kg.

Výhodou je možnost měření ze všech směrů, a také daleko menší náročnost na povrch zkoušeného materiálu (menší než Ra 6,3), než je u ultrazvukové metody. Přesnost měření je 3-15 %.

/10/

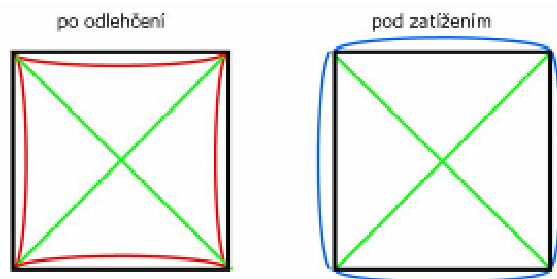
Měření tvrdosti metodou TIV

Zkratka metody TIV znamená Through Indenter Viewing, tedy v češtině pohled skrz vtlačovací tělísko (diamant). Jedná se o zcela novou metodu měření založenou na principu Vickersova diamantového jehlanu. Narozdíl od předchozích metod zde nedochází k rozkmitání zkoušeného materiálu. Používá se statické zatížení, které je přesnější o to, že nedochází k ovlivnění elastickými vlastnostmi materiálu. Průřez sondou je zachycen na obrázku č. 22.



Obrázek č. 22 – Průřez sondou pro měření metodou TIV

Vpich je snímán kamerou, a poté zobrazen na displeji. Přístroj sám změří úhlopříčky a podle nich určí tvrdost materiálu. Obrázek č. 23 zachycuje tvar vpichu pod zatížením a po odlehčení. Úhlopříčky však zůstanou stejné a tím je zajištěna přesnost měření.



Obrázek č. 23 – Tvar vpichu u metody TIV

Tato metoda měření tvrdosti se hodí jak pro velké, tak i malé díly. Její použitelnost není omezena minimální tloušťkou stěny nebo hmotností dílu. Používá se především pro homogenní materiály s povrchem do Ra 1,6. Je možné měřit tvrdost ze všech směrů a výsledná přesnost měření je do 3 %, což je velmi dobré. Velikou výhodou metody TIV je její nezávislost na modulu pružnosti E [MPa], což z ní dělá nejuniverzálnější metodu do použitelnosti na různé druhy materiálů. Nevýhodou je nutnost kolmého ustavení vůči zkoušenému materiálu.

/10/

3.3.4. Nedestruktivní zkoušky měření hloubky zakalených vrstev

V dnešní době se již bez těchto zkoušek neobejdeme. Je třeba aplikovat měření přímo na vyráběné díly. A to do takové podoby, aby nedošlo k jejich poškození. Proto se stále vyvíjí nové a nové metody tohoto nedestruktivního zkoušení. V této kapitole bych rád nastínil alespoň několik základních principů měření hloubek zakalených vrstev.

Měření metodou vířivých proudů

Metoda vířivých proudů využívá ke zjišťování hloubky zakalených vrstev působení elektromagnetického pole. Na zkoušený předmět působí střídavé magnetické pole cívky, které v něm indukuje elektrické napětí. Kovový předmět působí jako proudový vodič, a tak v něm vznikají cirkulární proudy, jinak nazývané vířivé. Tyto proudy působí magnetickými účinky zpětně na původní budící pole. Budící pole je jejich vlivem zeslabováno. Výsledné pole je tudíž dáno vektorovým složením pole budícího a pole vířivých proudů. K informaci o stavu

výrobku, tedy i hloubky zakalené vrstvy využíváme amplitudu a fázi výsledného pole. Vyhodnocení se děje pomocí napětí, které se ve výsledném poli vytvořilo (indukovalo). /7/

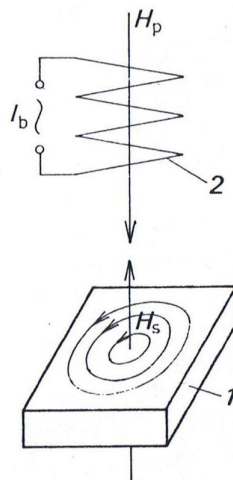
Rozlišujeme dva způsoby vyhodnocení a to:

Indukované napětí se vytvoří v cívce, která budí magnetické pole. Cívkový systém má jen jedno vynutí a měří se jeho impedance co do velikosti a fáze. Jedná se o *Způsob příložné cívky*.

Druhá možnost vyhodnocení je indukce napětí v druhé měřicí cívce. Cívkový systém má tedy budící a měřicí cívku. Měří se zde amplituda a fáze ve měřicím vinutí. Tento způsob nazýváme *Způsob průchozí cívky*.

Způsob příložné cívky

Tento způsob používáme zejména u rozměrnějších výrobků. Příložnou cívku napájíme střídavým proudem a radiálně ji přikládáme v povrchu zkoušeného předmětu. V povrchových vrstvách se vytvářejí vířivé proudy a magnetické pole těchto vířivých proudů zpětně ovlivňuje vlastnosti příložné cívky, jak je vidět na obrázku č. 24. Dochází ke změně impedance cívky.



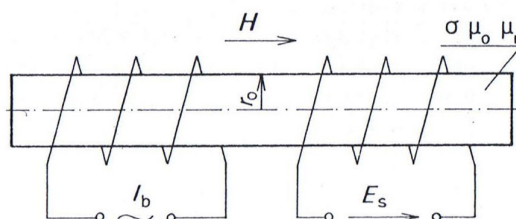
Obrázek č. 24 – Princip metody s příložnou cívkou – H_p – intenzita magnetického pole budící cívky, I_b – budící proud, H_s – intenzita magnetického pole vířivých proudů /7/

Způsob průchozí cívky

Tento systém obsahuje dvě vinutí. Jedná se vinutí budící a měřicí. Obě vinutí bývají navinuta na společném trubkovém nosiči z nevodivého materiálu – plastu. Zkoušený předmět je umístěn uvnitř tohoto nosiče a tvoří jádro cívky. Primární vinutí napájíme střídavým budícím proudem. Ten vytvoří střídavé magnetické pole. Účinkem magnetického pole vířivých proudů

na původní pole dochází ke vzniku výsledného pole, které indukuje napětí v měřicím vinutí.
/7/

Na obrázku č. 25 je zachycen princip měření. Je zde vidět budící cívka, měřicí cívka a zkoušený předmět, jež je umístěn jako jádro.



Obrázek č. 25 – Princip metody s průchozí cívkou – H – intenzita magnetického pole na povrchu snímaného tělesa, I_b – budící proud, E_s – snímané napětí, σ – měrná vodivost, μ_0 – permeabilita vakua, μ_r – relativní permeabilita, r_0 – poloměr zkoušeného tělesa /7/

Pro průnik proudů do hloubky s můžeme napsat vztah (1):

$$s^2 = \frac{1}{\pi \cdot f \cdot \mu \cdot \sigma} \quad (1)$$

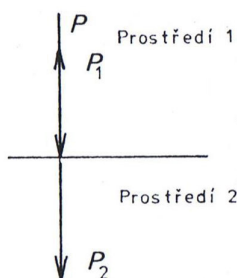
kde s je hloubka zasažené vrstvy [m], f je frekvence střídavého proudu [Hz], μ je permeabilita [$\text{H} \cdot \text{m}^{-1}$] a σ je měrná elektrická vodivost [$\text{A}^2 \cdot \text{s}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{m}^{-3}$]. /4/

Měření ultrazvukovou metodou

Velmi významnou nedestruktivní metodou je metoda ultrazvuková. Ultrazvukem se rozumí mechanické kmitání částic prostředí s frekvencí vyšší než 20000 Hz. Abychom mohli pochopit následující principy měření hloubky zakalené vrstvy, je nejprve třeba vysvětlit několik základních fyzikálních jevů ultrazvukových vln.

První z nich je to, jak se projevuje odraz ultrazvukových vln na rozhraní dvou prostředí (v našem případě zakalené vrstvy a přechodové zóny). Prochází-li vlna prostředím, je postupně tlumena až úplně zmizí. Dopadne-li ale na rozhraní dvou prostředí, které je kolmé

na směr šíření vlnění, část se odrazí zpět a část přejde do prostředí druhého. Takovýto odraz je znázorněn na obrázku č. 26. /7/

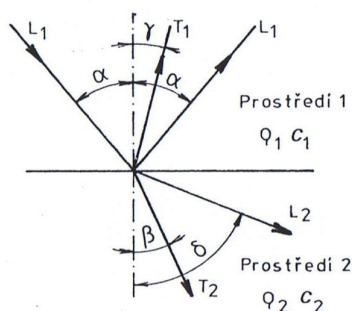


Obrázek č. 26 – Kolmý dopad vln na rozhraní dvou prostředí /7/

Pokud však ultrazvukové vlny nedopadají kolmo na rozhraní dvou prostředí, ale dopadají pod úhlem α , řídí se dopad těchto vln Snellovým zákonem odrazu a lomu (7):

$$\frac{\sin \alpha}{c_1} = \frac{\sin \beta}{c_2} \quad (7)$$

kde α je úhel dopadu v prostředí 1, β je úhel odrazu z prostředí 1 do prostředí 2 a c_1 a c_2 jsou rychlosti dopadu a odrazu [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]. /7/

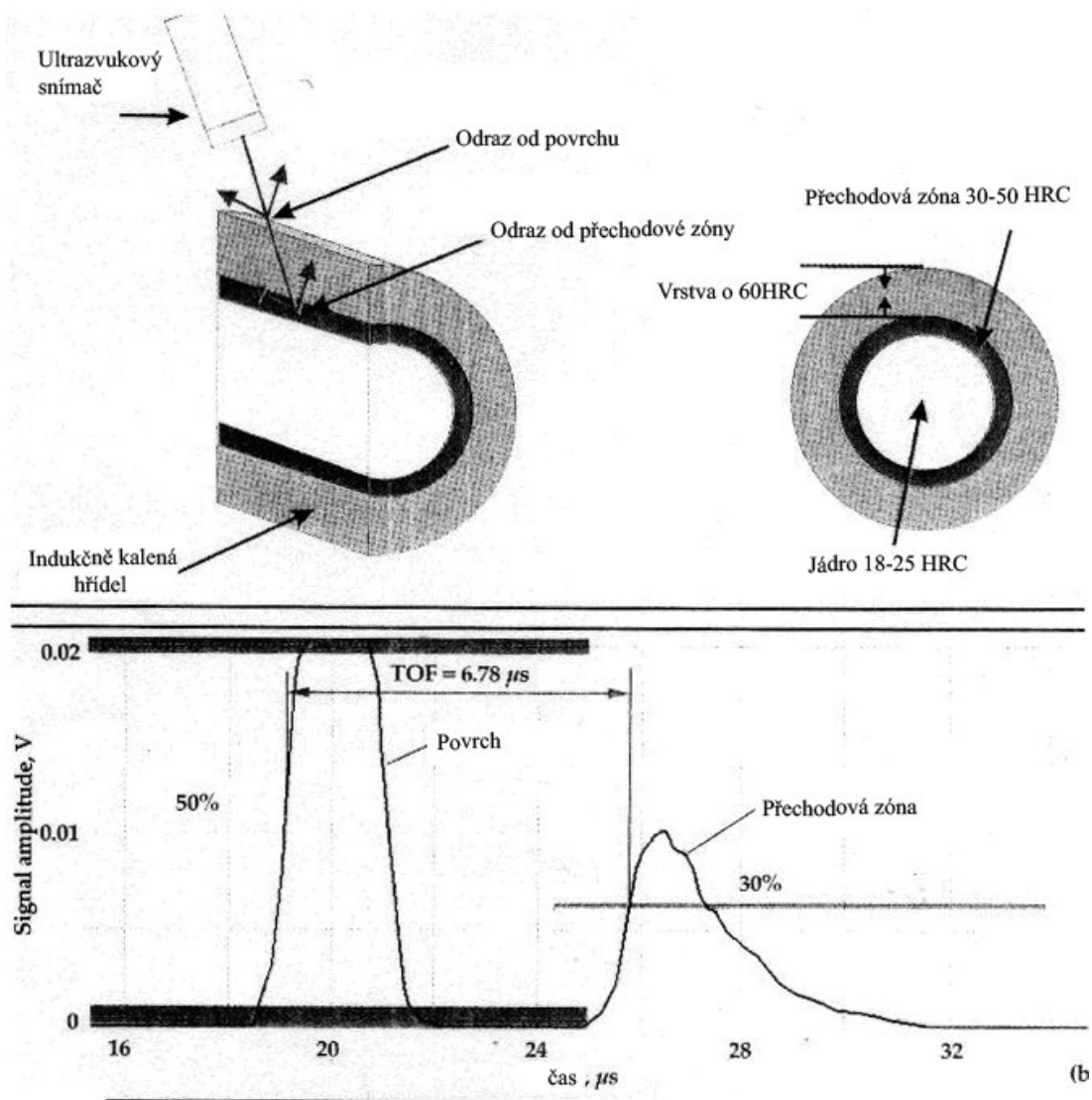


Obrázek č. 27 – Šikmý dopad vln na rozhraní dvou prostředí – T – vlna příčná,
L – vlna podélná /7/

Rozdíl mezi podélnou a příčnou vlnou je následující. U podélného vlnění částice prostředí kmitají přímočaře ve směru šíření vlnění. Vzniká zde zhušťování a zředňování částic prostředí. U příčného vlnění je kmitání částic kolmo na směr výsledného šíření vlny. /7/

Pro měření hloubek zakalené vrstvy se používá princip Impulsové odrazové metody. Při známé rychlosti šíření ultrazvuku v měřeném prostředí je doba průchodu ultrazvuku v materiálu úměrná tloušťce vrstvy. To znamená, že se měří čas letu mezi povrchem a přechodovou zónou, a poté dojde k převodu na hloubku měřené vrstvy s přesností na 5 %. Tento princip je zachycen na obrázku č. 28.

Pro použití této metody je však třeba, aby přechodová vrstva měla větší útlum než vrstva zakalená, tudíž aby měla větší hranice zrn, a aby byla heterogenní.



Obrázek č. 28 – Impulsová odrazová metoda /11/

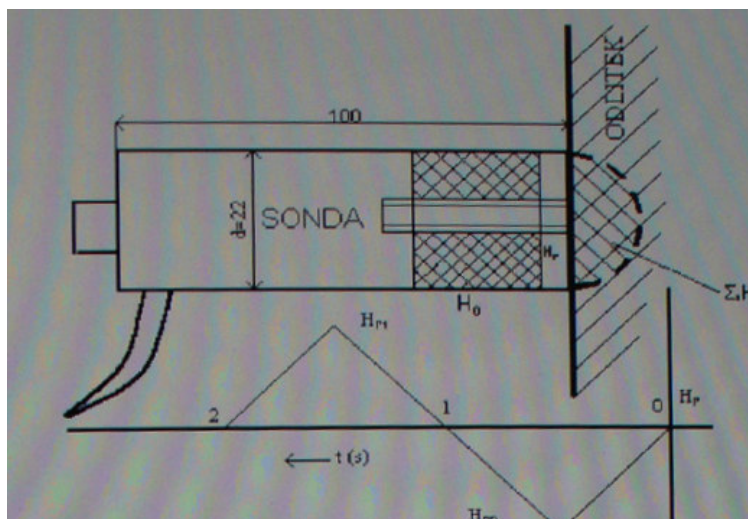
V horní části obrázku je vidět, jak se část ultrazvukových vln odrazí a část projde a odrazí se od přechodové zóny. Ve spodní části obrázku je vidět diagram závislosti amplitudy signálu na čase. Je zde patrný již dříve zmíněný čas letu (TOF – The time of flight). /11/

Měření metodou magnetického bodového pólu

Metoda magnetického bodového pólu, jinak nazývaná také Impulsová magnetická metoda je založena na využití magnetických vlastností feromagnetických materiálů. Principem se jedná o měření intenzity zbytkového magnetického pole v kontrolovaném materiálu pod čelem sondy. Hodnota této intenzity přímo závisí na množství a disperzi perlitu nebo martenzitu. Nepoužitelná je tudíž kupříkladu u kalených ocelí s perlitem v přechodové vrstvě, neboť perlit i martenzit dává skoro stejný signál. Je zde třeba, aby výstupní hodnoty magnetismu původní a kalené struktury byly rozdílné.

Měření metodou magnetického bodového pólu probíhá následovně:

Nejprve se zmagnetizuje povrch zkoušeného materiálu příložnou sondou, jejíž cívku napájíme trojúhelníkovými impulzy opačné polaridy. Hallův snímač, jenž je umístěn v ose cívky při povrchu čela sondy, nám změří intenzitu zbytkového pole měřeného místa po předposledním impulsu, který je kladný. Poté následuje poslední záporný impuls, po jehož skončení opět dojde ke změně intenzity zbytkového pole měřeného místa. Absolutní součet kladné a záporné intenzity zbytkového pole se ukáže na displeji měřicího přístroje. Tímto způsobem zjistíme hodnoty zmagnetizování měřeného místa a díky použití opačné polaridy se eliminuje nepříznivý vliv rušivých magnetických polí. Schéma sondy je na obrázku č. 29.



Obrázek č. 29 – Schéma příložné sondy /12/

Výhodou metody bodového pólu před metodou vířivých proudů je získání velmi vysokých hodnot intenzity magnetického pole bez tepelných účinků na sondu. Výhodou je také nulový vliv napětí, chemického složení a bezkontaktní působení bez vlivu velikosti oddálení snímače od povrchu zkoušeného výrobku. /12/

4. Praktická část

V následující části mé bakalářské práce bych se rád zaměřil na aplikaci nedestruktivních metod zkoušení přímo na charakteristické typy strojních součástí. V podnikové praxi bývá totiž velmi často zvykem používat běžné destruktivní metody měření. Ty jsou ale velmi nevýhodné v případech, kdy se musí například před rozjetím hromadného kalení ověřovat správná hloubka prokalení destruktivně řezem zkušební součásti. Proto je vhodné zvolit nedestruktivní zkoušení. Principy NDT zkoušení jsou různé a z důvodu různorodosti použitého materiálu součásti je třeba správně zvolit metodu.

4.1. NDT strukturoskopie vačkové hřídele motoru

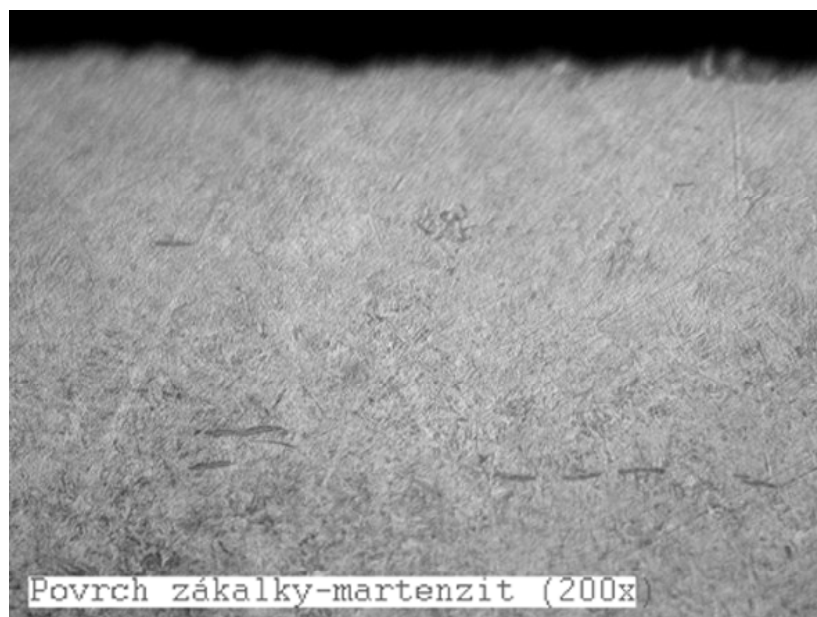
TEDOM

Vačkové hřídele motorů jsou velmi tvarově složité díly motorů, které jsou součástí mechanismu zprostředkovávající přenos rotačního pohybu převodových kol na přímočarý pohyb ventilů v hlavě motoru. Je to jeden z nejdůležitějších dílů motoru mající velmi výrazný vliv na přesnost otevírání a zavírání ventilů. Proto je třeba zajistit rozměrovou přesnost a stálost kontaktních ploch vačkové hřídele. Nejčastěji jsou proto tyto plochy povrchově kaleny. Je třeba ale zajistit dodržení vhodné hloubky a tvrdosti zakalení. A proto je zcela logické u této nesmírně tvarově složité součásti, že se zde použití běžných destruktivních metod nehodí.

Společnost TEDOM zabývající se výrobou nákladních vozidel a autobusů používá do vyráběných automobilů vznětové, ale i plynové motory. V divizi TEDOM MOTORY jsou tyto motory konstruovány. Námi zkoumaná vačková hřídel nákladního automobilu (viz. příloha 2) je po obrobení povrchově kalena. Jako výchozí materiál použitý na výrobu těchto hřídelí je využívána ocel 12 051.1.

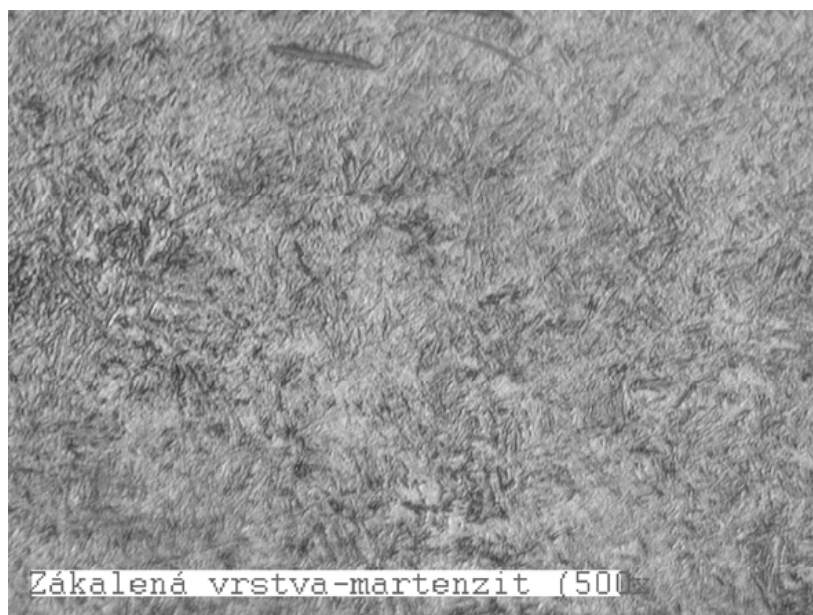
4.1.1. Metalografický rozbor materiálu vačkové hřídele

Na následujících obrázcích je zachycen průběh struktury námi zkoumané hřídele od povrchu až do jádra. Obrázek č. 30 ukazuje strukturu na povrchu hřídele. Je zde obsažen martenzit zajišťující tvrdost součásti.

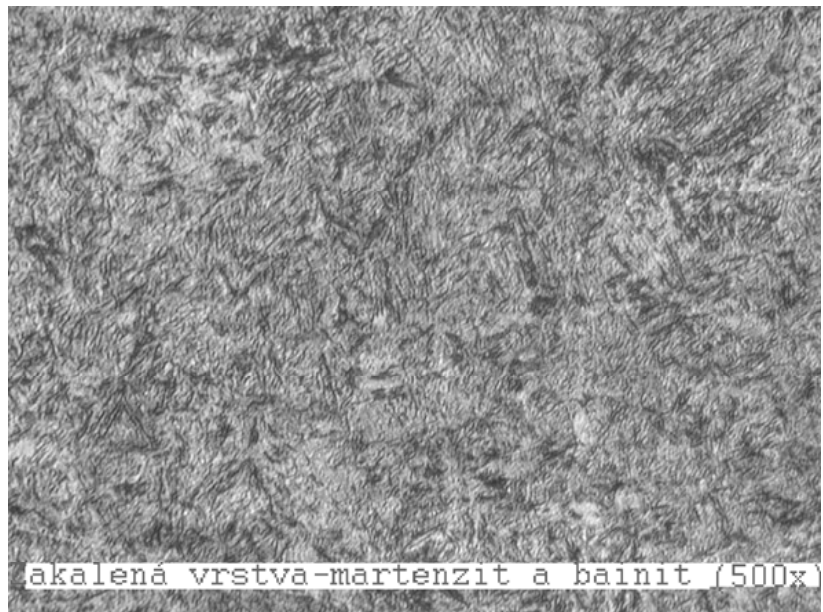


Obrázek č. 30 – Povrch zakalené vrstvy – obsažen martenzit v podobě jehlic

Pokud pokračujeme dále strukturou směrem k jádru, nalézáme zde stále martenzit, a postupně blíže a blíže k jádru také bainit (viz. Obrázek č. 31 a č. 32).

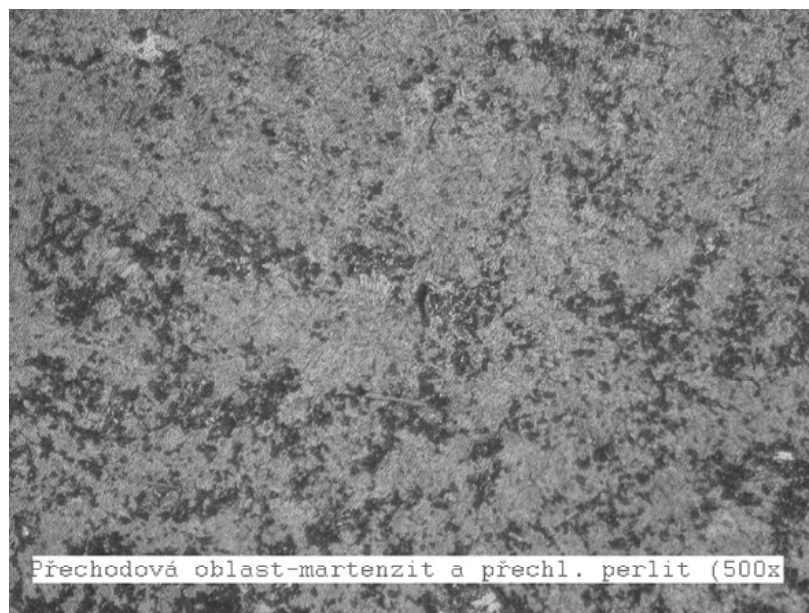


Obrázek č. 31 – Zakalená vrstva martenzitu



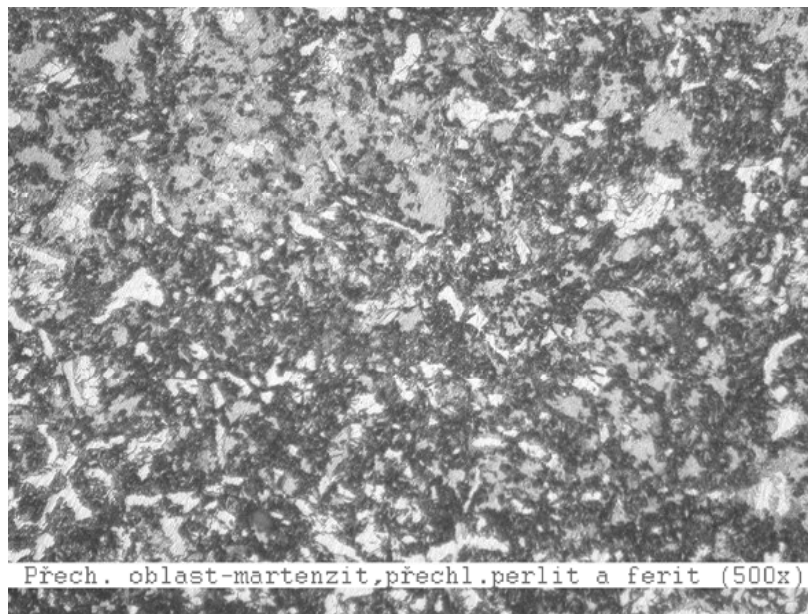
Obrázek č. 32 – Struktura martenzit a bainit

Na následujícím obrázku č. 33 je v přechodové oblasti pro naši práci velmi významný perlit v přechlazené formě. Ten bude mít rozhodující vliv při volbě nedestruktivní zkoušky.

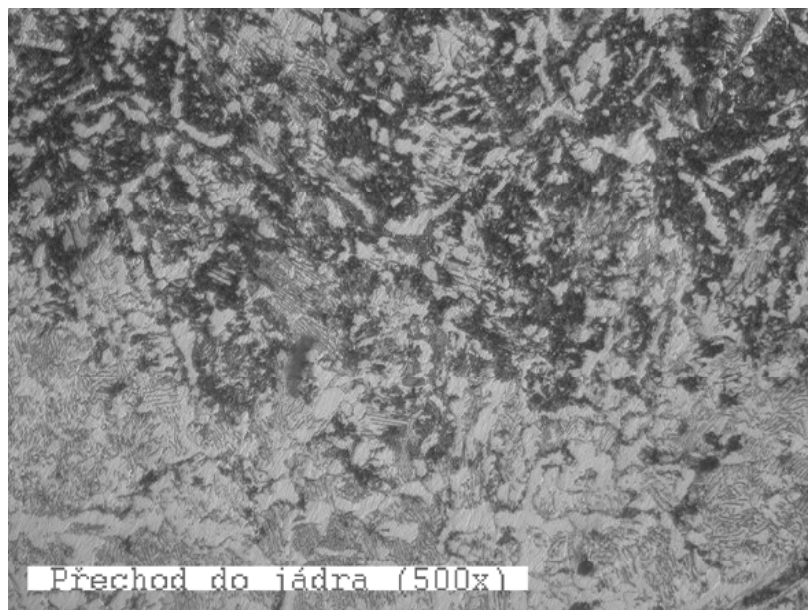


Obrázek č. 33 – Přechodová oblast – Martenzit a přechlazený perlit

Čím více se blížíme jádru, začíná se zde objevovat také ferit (viz. Obrázek č. 34).

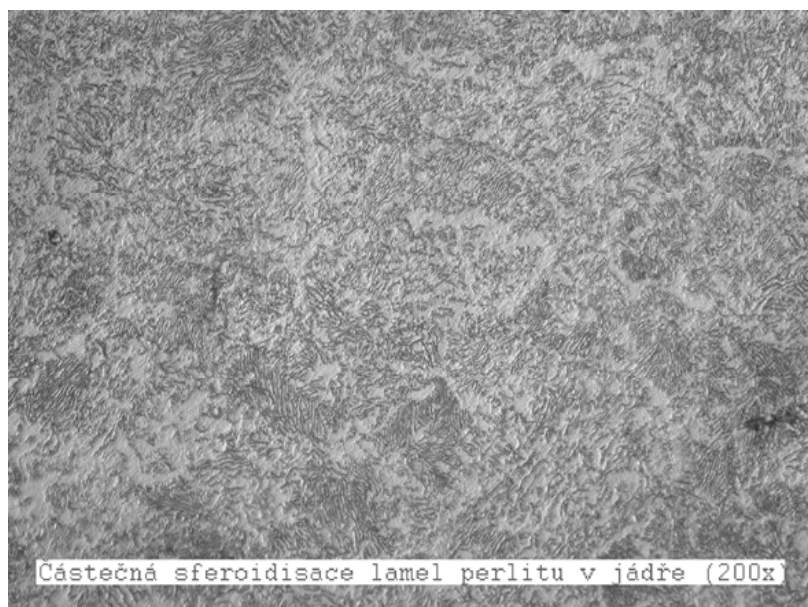


Obrázek č. 34 – Struktura martenzit, přechlazený perlit a ferit

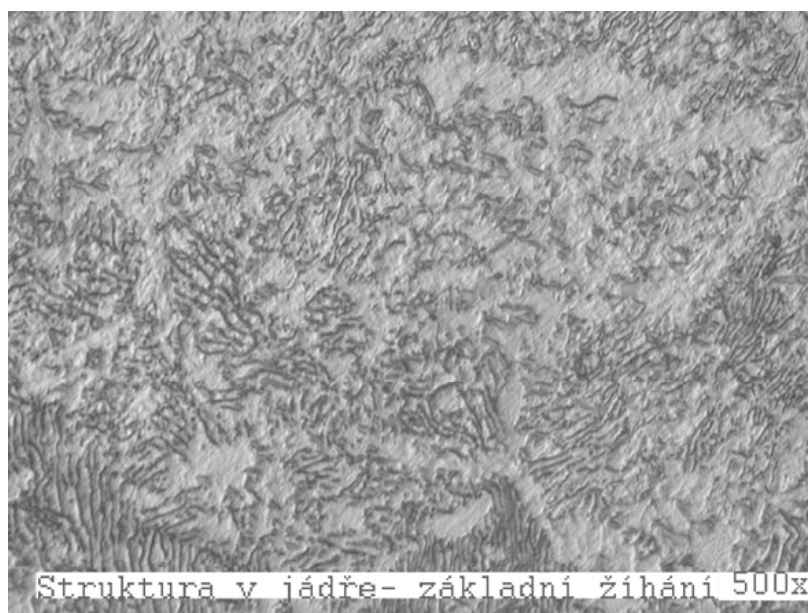


Obrázek č. 35 – Přechod do jádra

Zde (obrázek č. 35) je jasně viditelná další přechodová struktura. Ze struktury martenzit – přechlazený perlit – ferit přechází struktura na strukturu vznikající po základním žíhání. Dochází zde k postupné sferoidisaci (sbalování do kuličky) lamelárního perlitu (obrázek č. 36).



Obrázek č. 36 – Částečná sferoidisace lamel perlitu



Obrázek č. 37 – Struktura v jádře

Po provedeném metalografickém rozboru jsem zjistil, že je ve struktuře obsaženo velké množství perlitu (viz obrázek č. 33 a dále). Z toho důvodu se nehodí magnetické NDT zkoušky, neboť perlitická a martenzitická struktura dává téměř stejnou hodnotu magnetismu. Zaměříme se tedy na nedestruktivní zkoušení ultrazvukem. /11/

4.1.2. Návrh ultrazvukové metody měření hloubky zakalené vrstvy vačkové hřídele

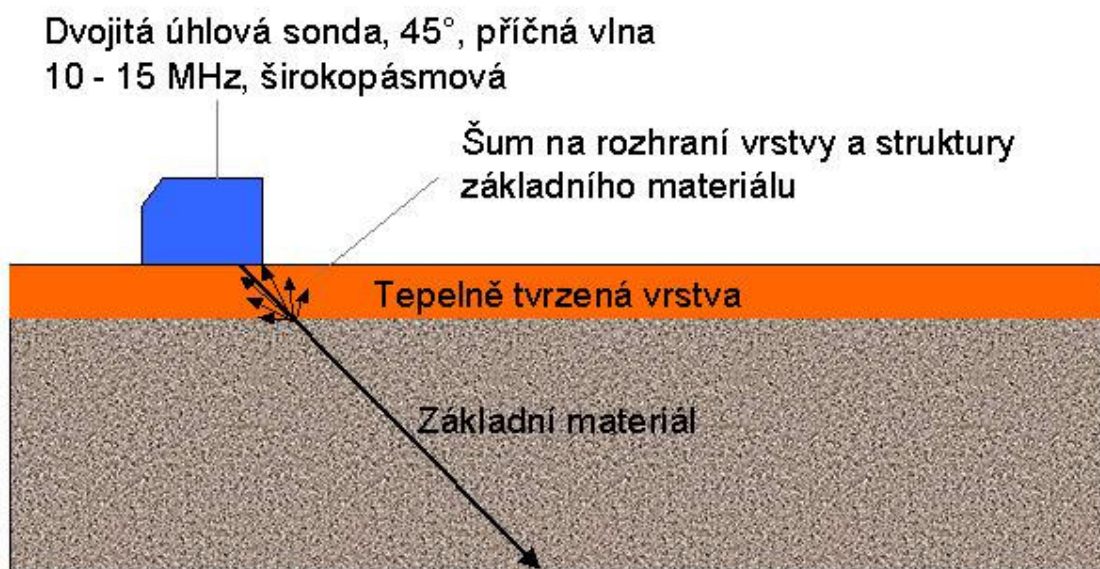
Společnost TESTIMA s. r. o. se již dlouhá léta zabývá nedestruktivním zkoušením materiálů. Pro mé měření ultrazvukovou metodou mi byla propůjčena měřicí sestava USLT 2000 (viz. příloha 3) pro nedestruktivní měření hloubky povrchově kalené vrstvy. Měřicí soustava se skládá z ultrazvukové měřicí sestavy (přístroj + vhodná sonda) a počítačového software. Tento software v sobě již v základní verzi obsahuje 3 moduly. Jedná se o modul měření frekvenčního spektra sondy, modul měření tloušťky stěn a také modul EHT - Effective Hardening Thickness sloužící pro měření hloubky zakalení. Metoda je vhodná pro měření vrstev tvrzených plamenem či induktivně. Používá se pro měření hloubek zakalení vačkových a klikových hřídelí, hydraulických válců, apod.. /10/

Princip metody:

Principem metody je to, že vlnová délka ultrazvukové vlny je o trochu větší než rozměr zrna v tvrzené vrstvě a o trochu menší než rozměr zrna v základním materiálu. Dojde tak k výraznému růstu útlumu od přechodové vrstvy. /10/

Měřicí technika:

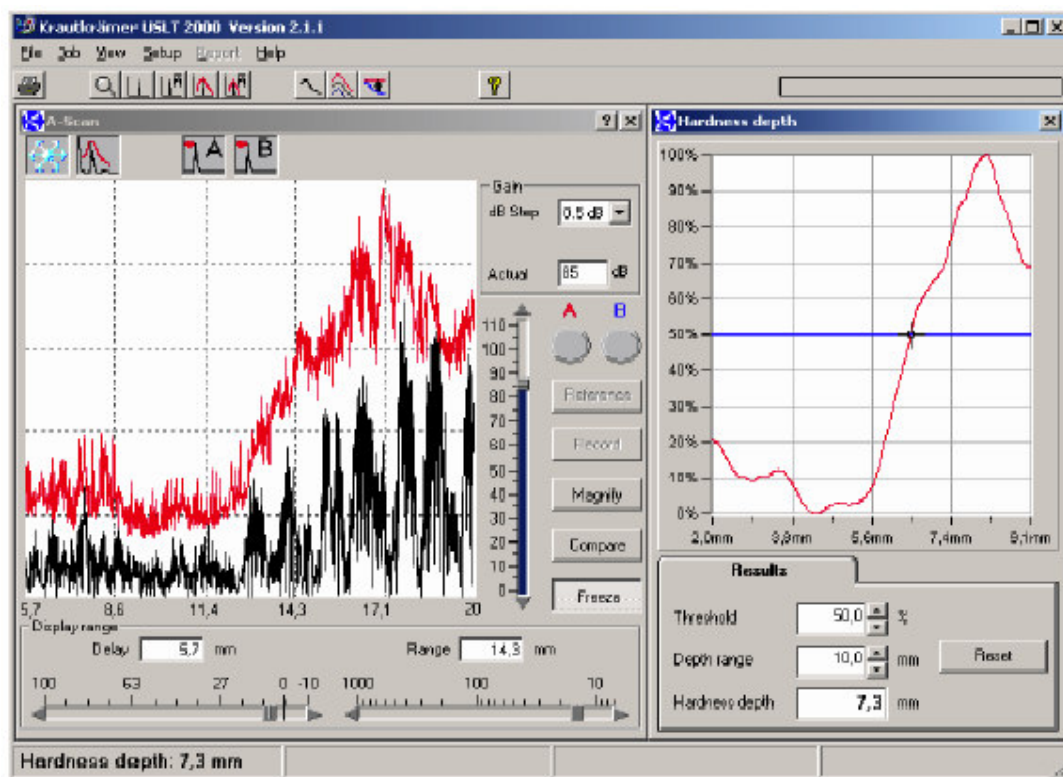
Jako příložná sonda je nejčastěji použita širokopásmová dvojitá úhlová sonda s úhlem lomu 45° vysílající příčné vlnění. Frekvence vlnění se pohybuje od 10ti do 15ti MHz. /10/



Obrázek č. 38 – Princip ultrazvukové metody měření hloubky zakalení /10/

Postup měření:

Vyhodnocení probíhá pomocí již zmíněného software EHT. Je však nejprve třeba přístroj zkalibrovat podle etalonu. Jako etalon poslouží vzorek zkoumané součásti se známou hloubkou zakalení a ze stejného materiálu jako jsou budoucí testované součásti. Na ten se přiloží měřící sonda a vytvoří spojení mezi sondou a etalonem pomocí vazebního prostředku (v našem případě Krautkramer XD-740). V softwaru se nastaví úhel sondy, zesílení, rozsah měřené hloubky, frekvence sondy a také tzv. prahová hodnota rozeznávací schopnosti přístroje. Toto nastavení je čistě experimentální a jemné vyladění přístroje zabere poměrně hodně času. Pokud jde vše ale hladce, zobrazí se podobný průběh křivky jako je na obrázku č. 39 vpravo. Tato křivka je vlastně obálka červené křivky A-scanu (obrázek č. 39 vlevo), která však vykazuje značný šum přístroje. Software vyhodnotí, v jaké hloubce nastal největší útlum a tuto hloubku vypočte. To by měla být námi hledaná hloubka zakalení na etalonu. Pokud to tak skutečně je, přístroj je správně nastavený a je připraven pro měření. Pokud hloubka neodpovídá hloubce zakalení, je třeba zvolit sondu o jiné frekvenci nebo s jiným úhlem lomu.



Obrázek č. 39 – Software EHT

4.1.3. Měření vačkové hřídele pomocí měřícího zařízení USLT 2000

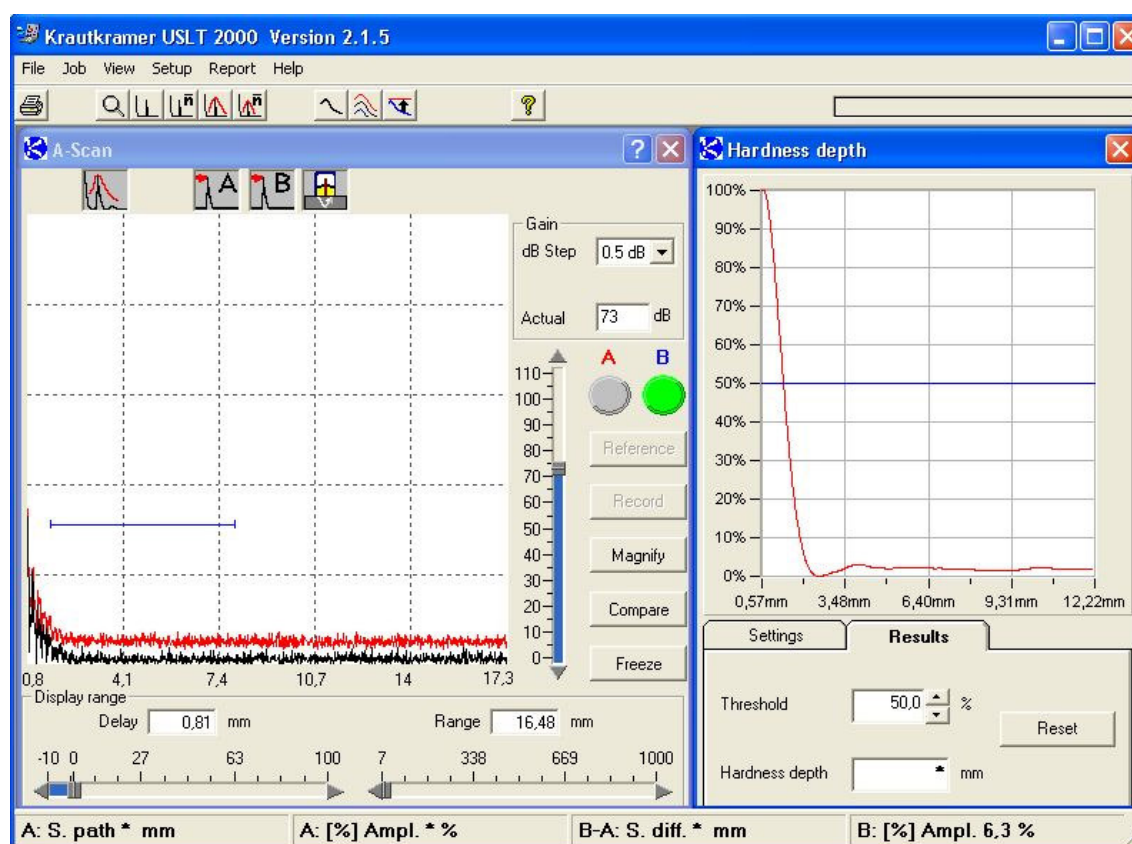
1.měření:

Použitá sonda: Jednoduchá úhlová sonda o frekvenci 10 MHz a úhlu lomu 45°

Vazební prostředek: Krautkramer XD-740

Etalon: Řez vačkovou hřídelí (viz. příloha 2)

Ani při dodržení správného postupu nastavení přístroje se nepodařilo zakalenou hloubku změřit. Docházelo k neustálým výkyvům této hodnoty. Nevhodný průběh vyhlazené křivky A-scanu zachycen na obrázku č. 40.



Obrázek č. 40 – EHT software – Nevhodný průběh křivky

2.měření:

Použitá sonda: Jednoduchá úhlová sonda o frekvenci 6 MHz a úhlu lomu 60°

Vazební prostředek: Krautkramer XD-740

Etalon: Řez vačkovou hřídelí (viz. příloha 2)

Po změně sondy a nastavení úhlu lomu a frekvence v softwaru se sonda opět přiložila na povrch etalonu. Průběh křivky se však nezměnil a software stále nebyl schopen určit hloubku.

3.měření:

Použitá sonda: Jednoduchá úhlová sonda o frekvenci 10 MHz a úhlu lomu 70°

Vazební prostředek: Krautkramer XD-740

Etalon: Řez vačkovou hřídelí (viz. příloha 2)

Ani při tomto měření jsem nezaznamenal úspěch. Průběh křivky je téměř beze změny.

4.měření:

Použitá sonda: Jednoduchá úhlová sonda o frekvenci 10 MHz a úhlu lomu 45° + zaoblená
předsádka sondy s poloměrem 31,5 mm

Vazební prostředek: Krautkramer XD-740

Etalon: Řez vačkovou hřídelí (viz. příloha 2)

Při tomto měření software začal ukazovat podstatně vyšší hodnoty hloubky zakalené vrstvy, než skutečně jsou. Také zde docházelo k neustálým výkyvům těchto hodnot. Tyto výkyvy jsou způsobeny tím, že sonda nedokonale přiléhá na povrch stykových ploch vačkové hřídele. Vyšší hodnoty hloubky zakalené vrstvy jsou způsobeny použitím jednoduché sondy. Pro tento případ by se hodila spíše sonda dvojitá, která souží k měření velmi malých hloubek zakalení (do 10 mm).

Po konzultaci s Ing. Jaroslavem Smejkaem ze společnosti Testima s. r. o. bylo shledáno, že neúspěch měření je zřejmě způsoben nízkou frekvencí sondy, která by měla být vyšší než 10 MHz. Dále by sonda měla být dvojitá. To znamená to, že by měla samostatně oddělený vysílač a přijímač. Také geometrie součásti a na ní nepřesně přiléhající rovné čelo sondy může mít také vliv na měření. Sondu o takovýchto parametrech se nepodařilo bohužel sehnat.

4.1.4. Měření gradientu tvrdosti vačkové hřídele napříč zakalenou vrstvou

V následující části mé práce bych se rád zaměřil na to, jak nám může pomoci NDT měření tvrdosti při kontrole vačkové hřídele. Při metalografickém rozboru bylo provedeno jako doplňující údaj o námi zkoumané součásti, vyhodnocení tvrdosti pomocí běžného měření tvrdosti Vickers. Pro takovéto měření je ale třeba destruktivně narušit již vyrobenou součást příčným řezem.

Výsledky měření uvádím informativně zde. Podmínky měření udává následující tabulka č. 1.

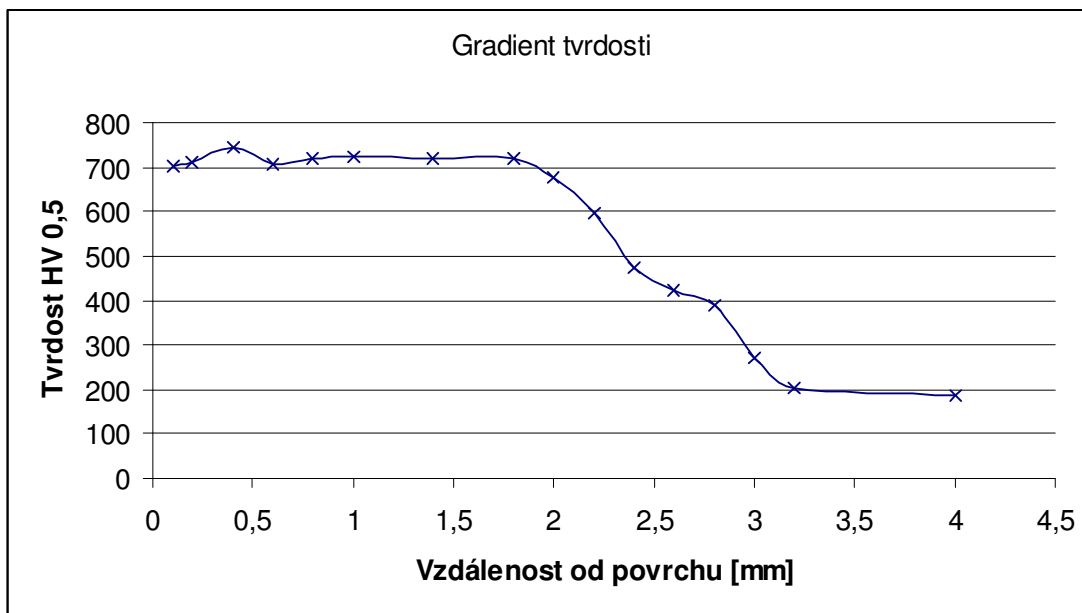
Metoda:	Vickers
Objektiv:	40x
Zatížení:	HV 0,5

Tabulka č. 1 – Podmínky měření tvrdosti

V následující tabulce č. 2 je uveden postupný gradient tvrdosti od povrchu až do jádra.

	Vzdálenost od povrchu (mm)	HV 0,5	d ₁ [μm]	d ₂ [μm]	d [μm]
1	0,1	703,2	35,5	37,1	36,3
2	0,2	710,7	35,4	36,9	36,1
3	0,4	742,9	35,9	34,8	35,3
4	0,6	707,4	35,8	36,6	36,2
5	0,8	720,5	35,6	36,2	35,9
6	1,0	724,0	35,8	35,8	35,8
7	1,4	717,5	35,5	36,4	35,9
8	1,8	718,2	35,6	36,2	35,9
9	2,0	675,8	37,5	36,6	37,0
10	2,2	595,4	38,5	40,4	39,5
11	2,4	473,7	43,4	45,0	44,2
12	2,6	425,3	47,6	45,8	46,7
13	2,8	389,0	48,7	49,0	48,8
14	3,0	269,2	60,6	56,8	58,7
15	3,2	204,2	67,5	67,3	67,4
16	4,0	185,4	68,3	73,1	70,7

Tabulka č. 2 – Gradient tvrdosti napříč zakalenou vrstvou



Graf č. 1 – Průběh tvrdosti napříč zakalenou vrstvou

Při pohledu na graf č. 1 je zřejmé, že největší tvrdosti bylo dosaženo v zakalené vrstvě zhruba při 0,4 mm od povrchu.

Toto měření nám podalo ale spíše informace o prokalitelnosti materiálu, než o charakteru zakalené vrstvy a o jejím vlivu na použitelnost součásti. Je pravda, že pokud zde dojde k nadměrnému zakalení, velmi často se poté stává, že se zakalená vrstva oddělí od vrstvy jádra prasklinou, která je především způsobena tím, že tlakové napětí v zakalené vrstvě výrazně překročí tahové napětí v přechodové vrstvě a jádru držící obě vrstvy pohromadě.

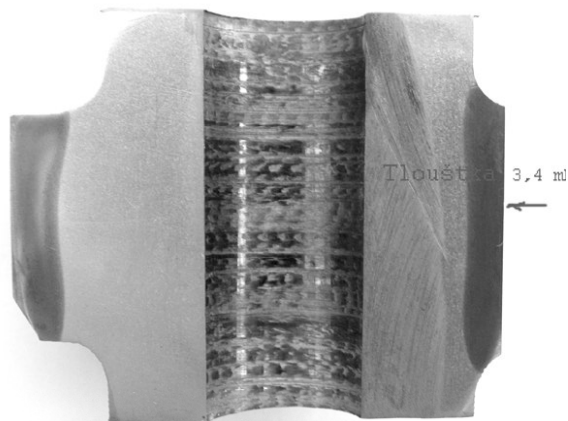
Dále se zde může vyskytovat oddělování rohů součástí. Tomu bychom měli zabránit vhodnou volbou geometrického zaoblení.

4.1.5. Návrh nedestruktivního měření tvrdosti a vliv šířky

zakalené vrstvy vačkové hřídele

V této kapitole je důležité nastínit, jak může velmi ovlivnit šířka zakalené vrstvy vlastní funkčnost součásti.

Obrázek č. 41 byl také pořízen při studiu struktury.



Obrázek č. 41 – foto řezu součástí

Pro naše účely je zde patrné, jak daleko až zasahuje zakalená vrstva. Můžeme zde vidět, že zasahuje až do geometrického zaoblení. To není vhodné zejména z důvodu přenesení koncentrace dvou napětí do těchto míst. Tato koncentrace dvojího napětí může často způsobovat u takovýchto zaobleních praskliny, a proto je třeba říci, že takováto součást není zrovna vhodně zakalena. Jako vhodná volba prokalení se zde jeví to, že zakalená vrstva musí zasahovat spíše před geometrické zaoblení. K této kontrole by nám mohlo pomoci nedestruktivní měření tvrdosti. Jak již bylo v předchozím textu nastíněno, existují podstatě 3 druhy NDT měření tvrdosti. Dynamická metoda a metoda TIV se zde nejeví jako vhodné volby, neboť obě vyžadují dobrý přístup k místu měření a to zrovna u geometrického zaoblení není. Zůstává zde metoda ultrazvuková, která je méně citlivá na kolmost a také umožňuje měřit ze všech směrů. Měření touto metodou je vhodné pro součásti od 0,3 kg a minimální tloušťky 2-3 mm, což by mohlo dle charakteru součásti také vyhovovat. Pro naši součást by mohl být vhodná volba přístroj MIC 10 od firmy Krautkramer, který využívá ultrazvukovou metodu UCI. Jako vhodná sonda se jeví sonda 50N prodloužená s označením MIC-205L.



Obrázek č. 42 – Ultrazvukový přístroj MIC 10

4.1.6. Vlastní vyhodnocení měření tvrdosti vačkové hřídele motoru TEDOM

Vlastní NDT měření a vyhodnocení tvrdosti probíhalo pomocí přístroje MIC 10. Během měření se ale ukázalo, že ve špatně přístupných místech (geometrické zaoblení) je přesnost měření velmi ovlivněna správným umístěním zkušebního hrotu vůči povrchu součásti (náchylné na kolmost). Již minimální odchylka polohy se vyznačovala rozdílnou hodnotou tvrdosti.

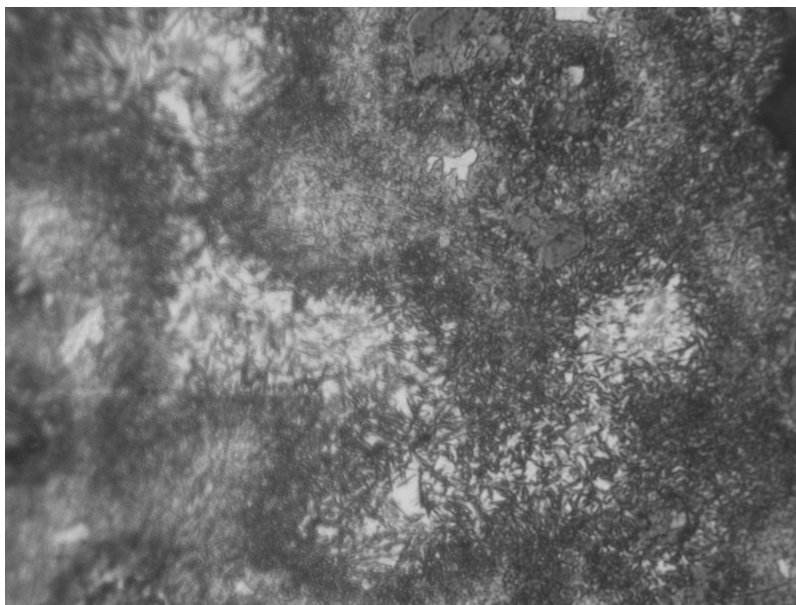
Přístroj MIC 10 vykazoval dobrou přesnost při měření rovinných ploch vačkové hřídele, a tudíž by byl použitelný pro měření stykových ploch vačkové hřídele, to znamená tzv. „palců“ vačkových hřídelí.

4.2. NDT strukturoskopie klikového hřídele automobilu ŠKODA

Jak je známo, kliková hřídel je strojní součást spalovacího motoru. Díky ní jsme schopni převést rotační pohyb převodové soustavy na pohyb přímočarý pístu. Její tvarová složitost a vysoká cena již naznačuje, že není vhodné destruktivní zkoušení struktury. Při volbě nedestruktivních metod zde bude hrát rozhodující roli opět struktura materiálu zkoušené součásti.

4.2.1. Metalografický rozbor materiálu klikové hřídele ŠKODA

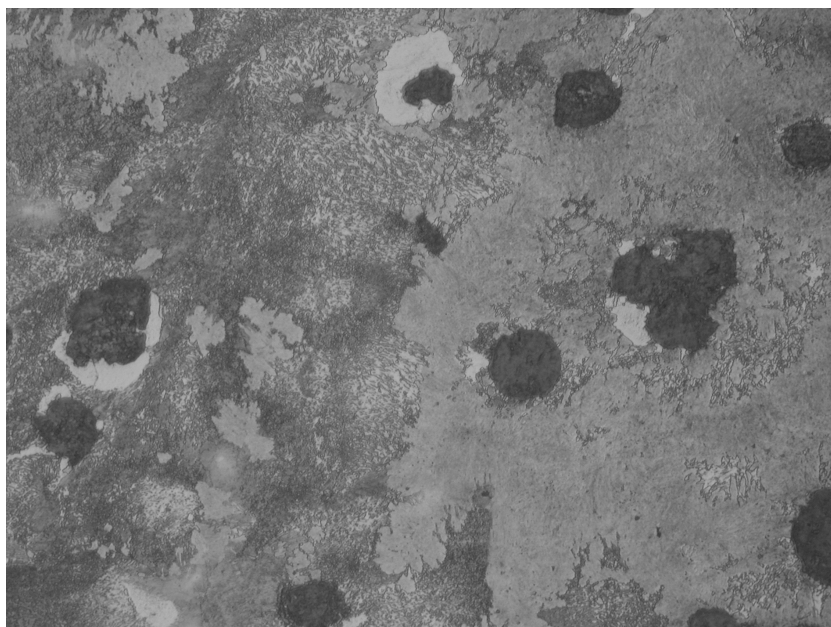
Námi zkoumaná kliková hřídel je vyrobena z LKG. Opět provedeme rozbor struktury, abychom mohli určit, jakou nedestruktivní metodou bude možno měřit.



Obrázek č. 43 – Povrchová vrstva klikové hřídele

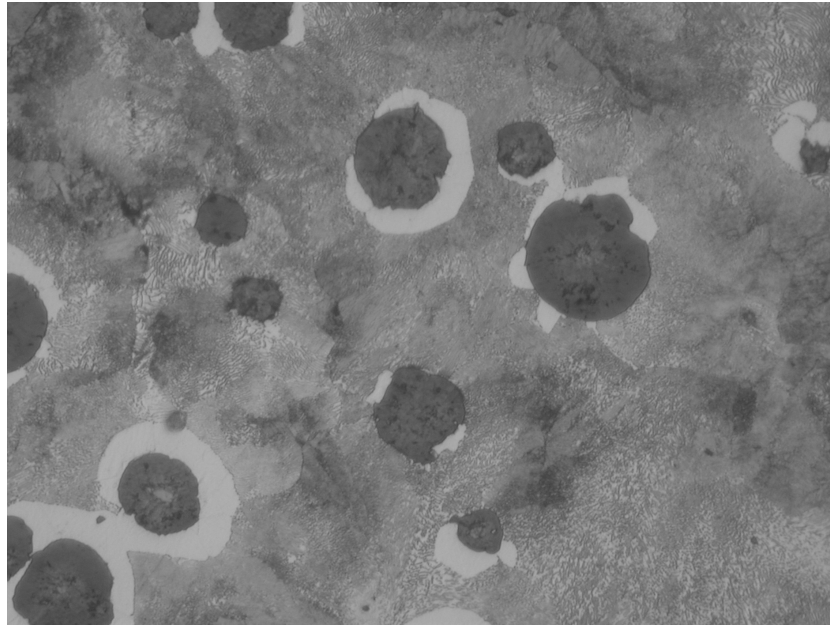
Obrázek č. 43 zachycuje strukturu povrchové vrstvy námi zkoumané klikové hřídele. Jsou zde opět patrné jehlice martenzitu.

Pokud pokračujeme dále strukturou, dostáváme se do přechodové vrstvy (viz. obrázek č. 44). Nacházíme zde kuličkový grafit s přiléhajícím feritem a také pro nás nejdůležitější lamelární perlit.



Obrázek č. 44 – Přechodová vrstva

Pro doplnění je zde ještě na obrázku č. 45 fotografie jádra součásti. Opět je zde pěkně vidět kuličkový grafit, jenž obklopuje ferit a dále lamely perlitu



Obrázek č. 45 – Jádru součásti

Z provedeného rozboru struktury jednoznačně vyplývá opět metoda ultrazvuková, neboť magnetické metody se zde z důvodu přítomnosti perlitu v přechodové vrstvě nedají použít.

/4/

4.2.2. Návrh ultrazvukové metody měření

Nebot' zde není cílem navrhnout metodiku pro kontrolu 100% součástí, ale metodu, kterou bude snadné určit hodnoty prokalení určitého souboru kalených klikových hřídelí, doporučoval bych zde opět metodu ultrazvukovou. V dalším postupu práce se pokusím vyzkoušet metodu měření pomocí ultrazvuku USLT 2000 (viz. kapitola 4.1.2.) firmy Testima s. r. o..

4.2.3. Měření klikové hřídele pomocí měřicího zařízení USLT 2000

K dispozici byly stejné sondy jako u měření vačkové hřídele nákladního automobilu TEDOM.

1.měření:

Použitá sonda: Jednoduchá úhlová sonda o frekvenci 10 MHz a úhlu lomu 45°

Vazební prostředek: Krautkramer XD-740

Etalon: Řez klikovou hřídelí (viz. příloha 4)

Po správném nastavení softwaru EHT byla přiložena sonda na řez klikovou hřídelí. Docházelo zde k výrazným rozdílům hodnot hloubek zakalení vypočtených softwarem. Průběh křivky A-scanu byl opět podobný jako na obrázku č. 40.

2.měření:

Použitá sonda: Jednoduchá úhlová sonda o frekvenci 6 MHz a úhlu lomu 60°

Vazební prostředek: Krautkramer XD-740

Etalon: Řez klikovou hřídelí (viz. příloha 4)

Druhá sonda o nižší frekvenci a úhlu lomu 60° také při měření nezaznamenala úspěch.

3.měření:

Použitá sonda: Jednoduchá úhlová sonda o frekvenci 10 MHz a úhlu lomu 70°

Vazební prostředek: Krautkramer XD-740

Etalon: Řez klikovou hřídelí (viz. příloha 4)

Ani poslední z dostupných sond nezaznamenala úspěch při měření. Průběh křivky byl téměř beze změny.

4.měření:

Použitá sonda: Jednoduchá úhlová sonda o frekvenci 10MHz a úhlu lomu 45° + zaoblená
předsádka sondy s poloměrem 31,5 mm

Vazební prostředek: Krautkramer XD-740

Etalon: Řez klikovou hřídelí (viz. příloha 4)

Při tomto měření také software ukazoval podstatně vyšší hodnoty hloubky zakalené vrstvy, než skutečně jsou. Docházelo k neustálým výkyvům těchto hodnot. Tyto výkyvy jsou zřejmě způsobeny tím, že sonda nedokonale přiléhá na povrch čepů klikové hřídele. Vyšší hodnoty hloubky zakalené vrstvy jsou způsobeny použitím jednoduché sondy. Pro tento případ by se hodila spíše sonda dvojité, která souží k měření velmi malých hloubek zakalení (do 10 mm).

Stejně tak jako při měření vačkové hřídele TEDOM (viz. kapitola 4.1.3.), tak i zde by úspěch měření zaznamenala dvojité úhlová sonda o frekvenci vyšší než 10MHz. Tuto sondu se však nepodařilo sehnat.

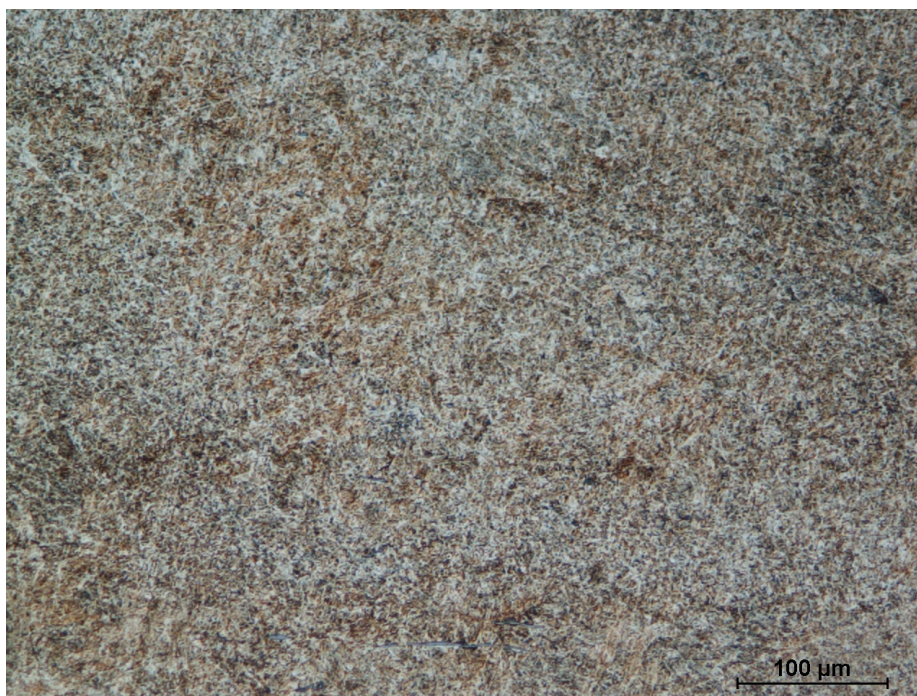
4.3. NDT strukturoskopie klikového hřídele automobilu TEDOM

Mnou zkoumaná kliková hřídel z nákladního automobilu TEDOM je vyrobena z oceli 15 330. Dle technických předpisů pro danou ocel by měla obsahovat 0,24 – 0,34 %C. Čepy této hřídele jsou dle předpisů indukčně povrchově kaleny na hloubku 2 – 4 mm, někdy až 6 mm. Tvrdost vrstvy je předepsána 50^{+6} HRC.

4.3.1. Metalografický rozbor materiálu klikové hřídele TEDOM

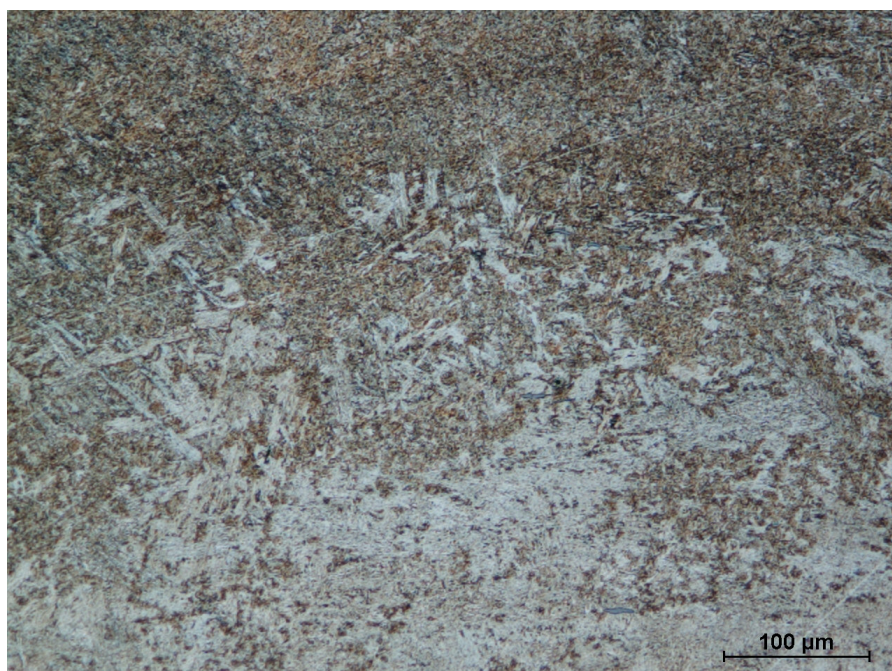
V následující části se opět pokusím navrhnout NDT metodu měření prokalení dle strukturního složení. Zde nám opět může struktura napovědět o tom, jak dále postupovat při volbě NDT metody zkoušení.

Povrchová vrstva je na obrázku č. 46 součásti. Je zde velmi špatně viditelná martenzitická struktura. To je zapříčiněno zřejmě částečným popuštěním struktury, které mohlo vzniknout tepelným ovlivněním součásti během provozu. Průměrná tvrdost této vrstvy je 529 HV.



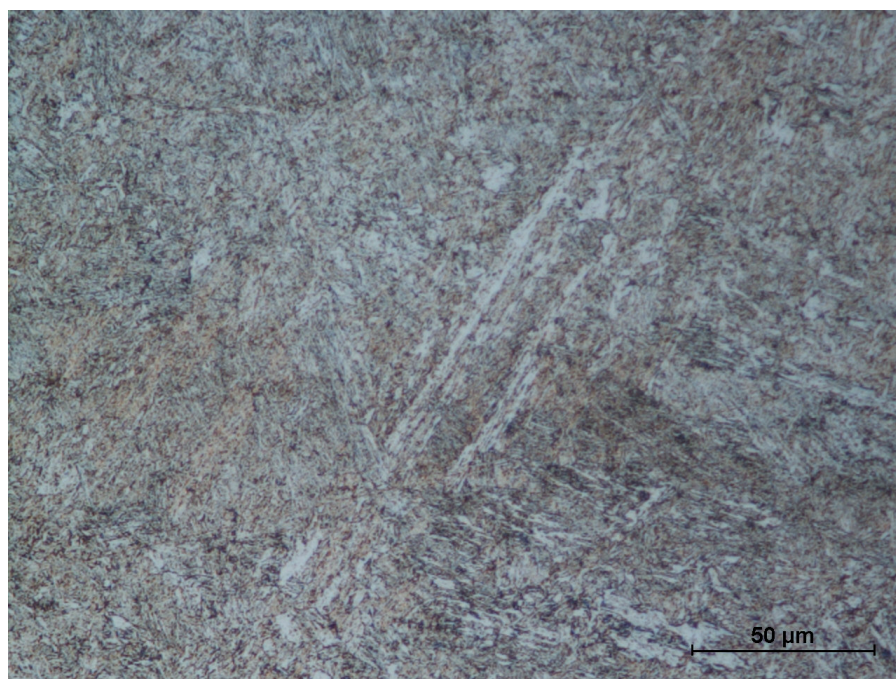
Obrázek č. 46 – Zakalená vrstva

Přechodová vrstva (viz. obrázek č. 47) této součásti je poměrně výrazná. Vidíme zde objevující se ferit ve stále vyšším a vyšším množství.



Obrázek č. 47 – Přechodová vrstva

Nakonec ještě na doplnění je zde struktura jádra. Při pohledu na obrázek č. 48 je vidět poměrně vysoký obsah feritu (přibližně 40%). Průměrná tvrdost jádra je 294 HV.



Obrázek č. 48 – Jádro součásti

4.3.2. Návrh metody měření hloubky zakalení klikové hřídele TEDOM

Rozhraní mezi povrchovou vrstvou součásti a přechodovou vrstvou je charakteristické vznikem a stále větším nárůstem feritické struktury směrem do jádra. Proto by zde mohly jít využít magnetické metody měření. V dalším průběhu mé práce se zaměřím na měření metodou magnetického bodového pólu. K tomuto měření bude použit přístroj DOMÉNA B3 (viz. příloha 1).

/4/

4.3.3. Měření klikové hřídele TEDOM pomocí přístroje DOMENA B3

Jako vzorová součást zde byl použit řez klikovou hřídelí (viz. příloha 5). Měření přístrojem DOMENA B3 a naměřené hodnoty zachycuje tabulka č. 3.

	Číslo měření	Hodnoty magnetismu M [A/m]
Zakalená vrstva	1	160
	2	148
Jádro	1	185
	2	162

Tabulka č. 3 – Naměřené hodnoty magnetismu M klikové hřídele TEDOM

Pokud porovnáme hodnoty magnetismu v zakalené vrstvě a v jádře, je zde patrný rozdíl. V prvním případě je to 25 A/m a v druhém případě 14 A/m. Jak je tedy patrné, měření přístrojem DOMENA B3 zde bude zřejmě mít své opodstatnění. Dalším stupněm, který by zde bylo nutné vytvořit, by mohla být tvorba jakési stupnice hodnot M, ke kterým by se přiřazovala přímo hloubka zakalení.

Jsou zde však problémy, na které je třeba ještě upozornit. Asi nejdůležitější z nich je to, že hodnoty magnetismu zakalené vrstvy byly zjištěny přiložením sondy na čep klikové hřídele a hodnoty magnetismu jádra byly zjištěny na rovné boční ploše hřídelového čepu. Tvar plochy, na kterou přikládáme sondu, totiž velmi ovlivňuje výslednou hodnotu magnetismu M. Tento geometrický vliv právě zachycuje tzv. demagnetizační činitel geometrického tvaru.

Proto je zde při dalším návrhu této metody i s tímto problémem počítat.

4.4. NDT strukturoskopie přírubových hřídelí a nábojů kola z automobilu Volkswagen

Poslední strojní součástí, mnou zkoumanou za účelem navržení NDT metod měření prokalení povrchově kalených vrstev, je přírubový hřídel a také náboj kola dodaný společností Volkswagen Slovakia a. s.. Obě tyto součásti jsou kaleny s vrstvami v rozmezí 2 – 5 mm. Jsou vyrobeny z oceli na zušlechťování (viz. tabulka č. 4 a č. 5).

Název	Typ materiálu	Norma	Značka	Použití
Uhlíková ocel k zušlechťování	Ocel	1.0503	C 45	Středně namáhané strojní součásti automobilů, železničních vagónů, strojů, motorů a přístrojů

Tabulka č. 4 – Analýza materiálu

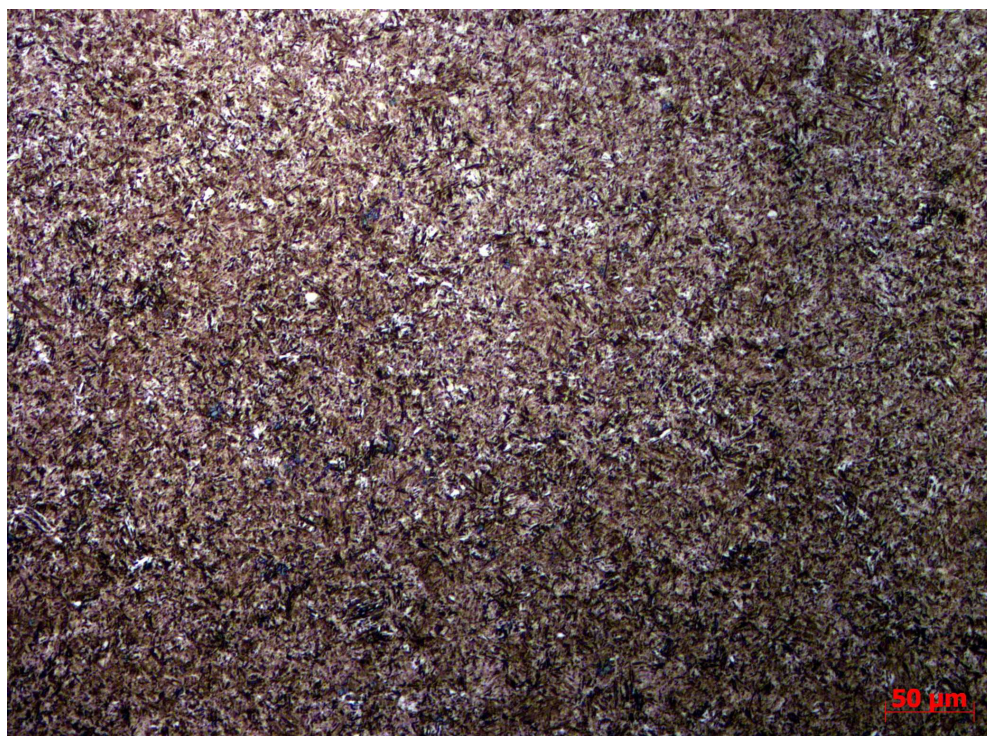
C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Cr+Mo+Ni
0,42- 0,5	0,4	0,5- 0,8	0,045	0,045	0,4	0,1	0,4	0,63

Tabulka č. 5 – Chemické složení materiálu

4.4.1. Metalografický rozbor materiálu přírubové hřídele a nábojů kola z automobilu VOLKSWAGEN

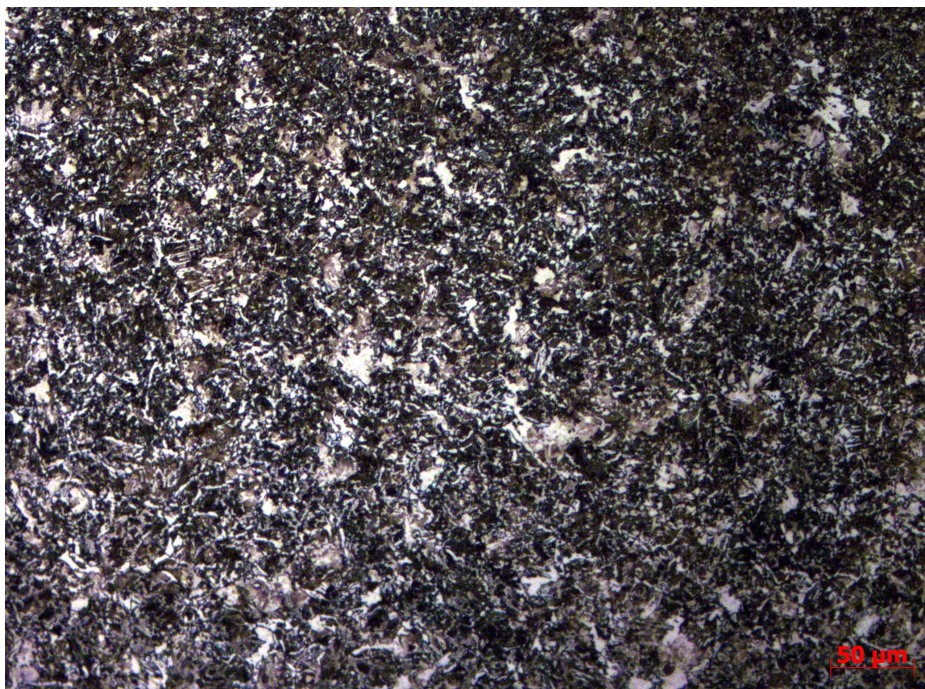
Jako vždy, tak i nyní je potřeba provést rozbor struktury za účelem zjištění strukturních vlastností.

Na následujícím obrázku č. 49 je velmi špatně viditelná zakalená oblast této součásti s poměrně malými jehlicemi martenzitu. Průměrná naměřená tvrdost této vrstvy je 653 HV.

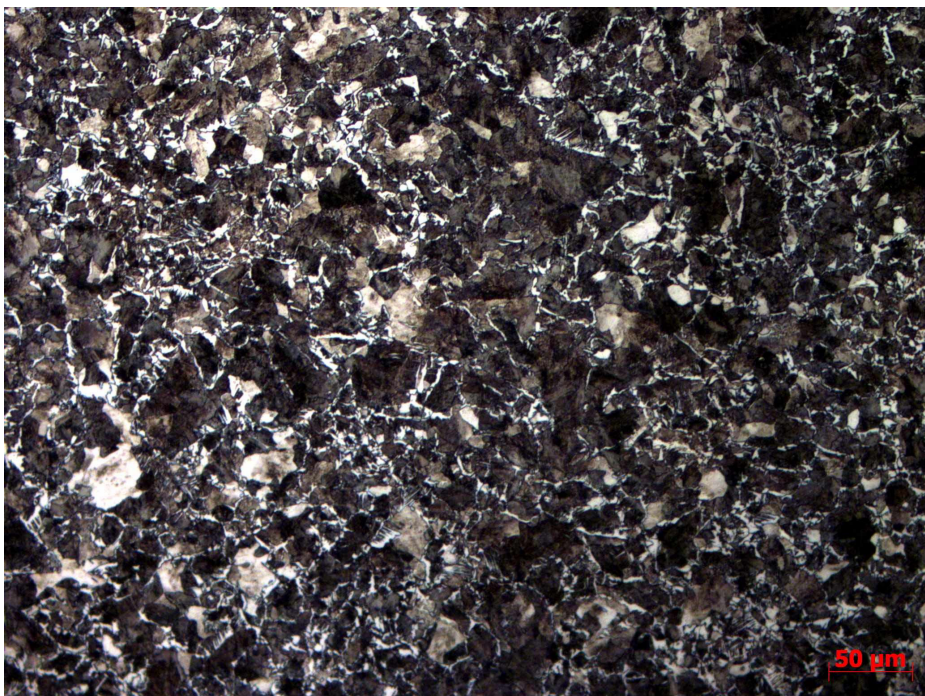


Obrázek č. 49 – Zakalená vrstva

Pokračujeme-li dále od povrchu přechodovou vrstvou (obrázek č. 50), vidíme zde postupný nárůst podílu feritu v této vrstvě. Na doplnění zde ještě uvádím obrázek č. 51, kde je viditelná mikrostruktura v jádře. V jádře průměrná tvrdost dosahuje hodnoty 258 HV.



Obrázek č. 50 – Přechodová vrstva



Obrázek č. 51 – Struktura v jádře

4.4.2. Návrh metody měření hloubky zakalení přírubové hřídele a nábojů kola

Stejně tak, jako v případě klikové hřídele automobilu TEDOM, tak i zde je struktura v povrchové vrstvě martenzitická a při přechodu do jádra se zde stále více objevuje ferit.

Tyto dvě strukturní složky by mohli vykazovat rozdílnou hodnotu magnetismu, a proto se domnívám, že bychom opět mohli provést měření magnetickými metodami, přesněji přístrojem DOMENA B3.

4.4.3. Vlastní měření přírubové hřídele a nábojů kola pomocí přístroje DOMENA B3

Vlastní měření přístrojem DOMENA B3 bylo obdobné jako v případě klikové hřídele nákladního automobilu TEDOM.

Měření hodnot magnetismu M [A/m] dvou zakalených přírubových hřídelí:

Nejprve se provedlo měření na dvou zakalených přírubových hřídelích. Zde bylo velkou výhodou, že byla k dispozici také součást nezakalená. Tudíž bylo možné přímo ve stejném místě změřit hodnoty magnetismu zakalené a nezakalené vrstvy.

	Místo	Hodnota magnetismu M [A/m]
Přírubový hřídel 1 - zakalený	Zakalená vrstva	199
		174
Přírubový hřídel 3 - nezakalený	Nezakalená vrstva	232
		219

Tabulka č. 6 – Hodnoty magnetismu přírubové hřídele 1

U první měřené hřídele je viditelný rozdíl hodnot magnetismu zakalené a nezakalené součásti. V prvním případě je to 33 A/m a v druhém 45 A/m.

	Místo	Hodnota magnetismu M [A/m]
Přírubový hřídel 2 - zakalený	Zakalená vrstva	213
		172
Přírubový hřídel 3 - nezakalený	Nezakalená vrstva	232
		219

Tabulka č. 7 – Hodnoty magnetismu přírubové hřídele 2

V druhém případě jsou rozdíly hodnot magnetismu 19 A/m a v druhém 47 A/m.

Díky výrazným rozdílům v hodnotách magnetismu zakalené a nezakalené vrstvy můžeme říci, že pravděpodobně bude možné skutečně měřit hloubku zakalení pomocí přístroje DOMENA B3. Dalším stupněm, který by zde bylo nutné vytvořit, by mohla být tvorba jakési stupnice hodnot M, ke kterým by se přiřazovala přímo hloubka zakalení.

Měření hodnot magnetismu M [A/m] dvou nábojů kola:

	Místo	Hodnota magnetismu M [A/m]
Náboj kola 1 - zakalený	Zakalená vrstva	298
		246
Náboj kola 3 - nezakalený	Nezakalená vrstva	313
		291

Tabulka č. 8 – Hodnoty magnetismu náboje kola 1

U prvního náboje kola je opět velmi výrazný rozdíl hodnot magnetismu zakalené a nezakalené součásti. V prvním případě je to 15 A/m a v druhém 45 A/m.

	Místo	Hodnota magnetismu M [A/m]
Náboj kola 2 - zakalený	Zakalená vrstva	294
		256
Náboj kola 3 - nezakalený	Nezakalená vrstva	313
		291

Tabulka č. 9 – Hodnoty magnetismu náboje kola 2

U druhého náboje kola je také výrazný rozdíl hodnot magnetismu zakalené a nezakalené součásti. Rozdíl při prvním měření je to 19 A/m a v druhém 35 A/m.

Stejně jako u předchozí součásti, tak i zde jsou výrazné rozdíly v hodnotách magnetismu zakalené a nezakalené vrstvy. Můžeme říci, že pravděpodobně bude možné skutečně měřit hloubku zakalení pomocí přístroje DOMENA B3. Dalším stupněm by zde měla být tvorba stupnice hodnot M, ke kterým by se přiřazovala přímo hloubka zakalení.

5. Diskuze

Náplní mé bakalářské práce bylo pokusit se navrhnout nedestruktivní metody měření hloubek a tvrdostí povrchově kalených vrstev čtyř, respektive pěti strojních součástí. V dnešní době se pro měření hloubky zakalení využívají nejčastěji 3 principy měření. Dva z nich jsou založeny na změně magnetických vlastností zakalené a přechodové vrstvy. Je to metoda měření pomocí vířivých proudů a metoda magnetického bodového pólu. Třetí metoda měření hloubky zakalení je založena na principu využití ultrazvukového přístroje. Při volbě metod měření byl asi nejdůležitější faktor volby struktura zakalené a přechodové vrstvy.

U první součásti, pro kterou měla být navržena metoda měření, tedy vačkové hřídele z nákladního automobilu TEDOM, byla dle vysokého obsahu perlitické struktury v přechodové vrstvě jediná možná metoda ultrazvuková. Magnetické metody měření zde nebyly vhodné. Společnost Testima s. r. o. mi zapůjčila ultrazvukovou měřicí sestavu

USLT 2000 s několika různými druhy příložných sond. Zkoušená součást byla proměřena těmito sondami, avšak ani po velmi pečlivém nastavování měřicího softwaru a kalibrování přístroje a sondy nebylo dosaženo jednoznačného výsledku. Po konzultaci s Ing. Jaroslavem Smejkallem ze společnosti Testima s. r. o. bylo shledáno, že neúspěch měření je zřejmě způsoben nízkou frekvencí sondy, která by měla být vyšší než 10 MHz. Dále by sonda měla být dvojitá. To znamená to, že by sonda měla samostatně oddělený vysílač a přijímač. Také poměrně složitá geometrie součásti komplikovala měření, neboť sondy nepřiléhali příliš dokonale. Proto by zde bylo jediné řešení ještě vyzkoušet dvojitou úhlovou sondu s frekvencí 12 MHz nebo 15 MHz a vyrobit speciální předádku na uchycení sondy, kopírující povrch součásti. Takovouto sondu se však nepodařilo sehnat.

Dále jsem měl možnost vyzkoušet měření tvrdosti vačkové hřídele. Z nedestruktivních metod měření tvrdosti byla zvolena ultrazvuková metoda UCI. Zástupce této metody je přístroj MIC10 propůjčený opět společností Testima s. r. o.. Pokoušel jsem se vyřešit problém, jestli by nebylo možné změřit hloubku zakalení na stranách vačky postupným měřením tvrdosti od povrchu do jádra. Zde se však vyskytl problém. Tento přístroj vyžadoval velmi přesné nastavení kolmosti vůči povrchu. To nebylo bohužel možné lidskou rukou docílit. Toto měření tvrdosti se ukázalo perspektivní pouze přímo na stykové ploše vačkové hřídele.

Druhou strojní součástí, pro kterou měla být navržena metoda nedestruktivního měření hloubky zakalení, byla kliková hřídel osobního automobilu ŠKODA s litiny s kuličkovým grafitem. Dle strukturního složení vyšla opět jako nejvhodnější metoda, metoda ultrazvuková. Opět byl použit přístroj USLT 2000, avšak ani zde nebyl zaznamenán úspěch v měření.

Důvody neúspěchu byly stejné jako u vačkové hřídele TEDOM. Jediným dalším novým důvodem neúspěchu by ještě mohl být možný výrazný útlum kuliček grafitu. Řešením je opět jediň pokusit se sehnat sondu s vhodnou frekvencí.

Cena měřicího ultrazvukového přístroje USLT 2000 se pohybuje od 300 000 Kč do 500 000 Kč dle softwarového vybavení. Ceny sond použitých při měření se pohybují v desítkách tisíc Kč.

Třetí zkoumanou součástí byla kliková hřídel nákladního vozu TEDOM. Dle strukturního složení zde bylo poprvé možné využít magnetické metody. Přesněji se jedná o metodu magnetického bodového pólu. Tento princip měření využívá přístroj DOMENA B3, který byl právě použit k měření. Zde toto měření zaznamenalo úspěch. Byly zde jasň viditelné rozdíly v hodnotách magnetismu M zakalené a nezakalené vrstvy. Problémem zde stále zůstává vytvoření stupnice hodnot M, ke kterým bude přiřazena přesná hloubka zakalení.

Posledními zkoumanými součástmi byly přírubové hřídele a náboje kola z osobního automobilu Volkswagen. Zde byla dle struktury s úspěchem použita opět metoda magnetického bodového pólu pomocí přístroje DOMENA B3. U obou typů součástí zde byly opět výrazné změny hodnot magnetismu M zakalené a nezakalené vrstvy. Je zde opět ale jistý problém s určením stupnice hodnot M, ke kterým bude přiřazena hloubka zakalení. Cena přístroje DOMENA B3 je dle informací od výrobce 59 950 Kč.

6. Závěr

Dle zadání bakalářské práce bylo provedeno následující:

1. Seznámení se s technickou dokumentací kalených součástí a s jejich strukturou.
2. Byla provedena rešerše používaných destruktivních a NDT metod stanovení hloubky a tvrdosti prokalení.
3. Byl proveden návrh a byly ověřeny podmínky pro NDT metodiku měření hloubky a tvrdosti konkrétních povrchově kalených součástí.

Provedenými měřeními byly dosaženy následující poznatky:

1. Hloubku zakalení vačkové hřídele nákladního automobilu TEDOM je nutné, dle rozboru struktury, měřit ultrazvukovou metodou. Měřicí sestava USLT 2000 vyžaduje dvojitou sondu s frekvencí vyšší než 10 MHz.
2. Tvrdost zakalené vrstvy vačkové hřídele měřené přístrojem MIC 10 se sondou MIC-205L je možné měřit pouze na stykových plochách. Tato měřicí sestava je náchylná na kolmost.
3. Hloubku zakalení klikové hřídele automobilu ŠKODA z LKG je nutné měřit ultrazvukovou metodou. Použitá sestava USLT 2000 vyžaduje také dvojitou sondu s frekvencí vyšší než 10 MHz.
4. Hloubku zakalení klikové hřídele nákladního automobilu TEDOM je možné měřit metodou magnetického bodového pólu. Tuto metodu využívá přístroj DOMENA B3. V dalším vývoji je třeba vytvořit stupnici hodnot magnetismu M, ke které bude přiřazena přesná hloubka zakalení.
5. Hloubku zakalení přírubového hřídele a náboje kola z automobilu Volkswagen je také možné měřit metodou magnetického bodového pólu. Je zde také třeba vytvořit stupnici hodnot magnetismu M, ke které bude přiřazena přesná hloubka zakalení.

Použitá literatura:

- /1/ Korecký, J.: Kalení oceli. Vydavatelství ROH Praha 1951.
- /2/ Korecký, J.: Tepelné zpracování železných a neželezných kovů. SNTL Praha 1960.
- /3/ Stuchlík, F.: Přednášky předmětu Tepelné zpracování a zkoušení materiálu – prezentace PowerPoint. Liberec 2007/2008.
- /4/ Skrbek, B.: Měření hloubky povrchového zakalení klikových hřídelů. Zpráva 93/08 LIAZ Jablonec středisko 10-291.
- /5/ Vyhlídko, Nosek, Petřík: Nauka o materiálu - Návod na cvičení. Nakladatelství VŠST Liberec 1991.
- /6/ Pluhař, J. a kol.: Nauka o materiálech. SNTL/ALFA Praha 1989.
- /7/ Věchet, Keshl, Špika, Eder: Defektoskopie v otázkách a odpovědích. SNTL Praha 1989.
- /8/ Hluchý, Kolouch: Strojírenská technologie 1 - 1.díl - Nauka o materiálu. Nakladatelství Scientia Praha 1999.
- /9/ Hluchý, Modráček, Paňák: Strojírenská technologie 1 - 2.díl - Metalografie a tepelné zpracování. Nakladatelství Scientia Praha 1999.
- /10/ TESTIMA, s. r. o.: Prezentace nedestruktivních metod měření tvrdosti. Internetové stránky www.testima.eu.
- /11/ Rivenez, Lambert, Flambard, Martinez: Mesurer par ultrasons Les profondeurs de trempe. TRAITEMENT TERMIQUE 275 – 94.
- /12/ Netáhl, P.: Měření metodou magnetického bodového pólu na tenkých stěnách ocelí a litin. Diplomová práce V 67/05 S Liberec 2005

Seznam příloh:

- Příloha 1 - Bateriový přístroj pro měření strukturně mechanických vlastností litin a ocelí
D O M E N A - B 3.b
- Příloha 2 - Řez vačkové hřídele nákladního automobilu TEDOM
- Příloha 3 - Měřicí sestava USLT 2000
- Příloha 4 - Řez klikovou hřídelí Škoda
- Příloha 5 - Řez klikovou hřídelí nákladního automobilu TEDOM
- Příloha 6 - Řez přírubovým hřídelem z automobilu Volkswagen
- Příloha 7 - Řez nábojem kola automobilu Volkswagen

Příloha 1:

Bateriový přístroj pro měření strukturně mechanických vlastností litin a ocelí

DOMENA - B 3.b

PRINCIP:

Přístroj využívá metody magnetického bodového pólu, kdy příložnou sondou (standardně průměr 21mm) změří intenzitu remanentního magnetické pole kontrolovaného objemu materiálu (do hloubky cca 5mm) součásti jejíž hodnota přímo závisí např. na množství a disperzi perlitu, či hloubce prokalení.

POUŽITÍ:

Velmi krátký čas jednoho měření (cca 3s) a jednoduchá obsluha zaručují vysokou výkonnost a spolehlivost při praktické kontrole ve výrobě odlitků i tvářených ocelových dílů a provozní strukturní diagnostice. DOMENA B3.b umožňuje stanovit a přímo na displeji ukazovat hodnoty tvrdosti, pevnosti, hloubku prokalení. Tedy všech vlastností, které závisí na množství a disperzi magneticky tvrdých strukturních složek jako perlit, cementit, bainit...

Dlouhodobé zkušenosti z provozního nasazení přístrojů typu DOMENA nám umožní snadno řešit Vaše kontrolní problémy v této oblasti.

POPIS:

Přístroj je přenosný, nezávislý na vnějším napájení a umožňuje rutinní nasazení v provozu. Má digitální údaj změřené hodnoty, umožňující bezchybné a rychlé přečtení. Pro nabíjení akumulátorů je dodávána nabíječka, která zabezpečuje nabíjení záložních akumulátorů mimo měřicí přístroj. Jednoduchou výměnou akumulátorů v přístroji dosáhneme možnosti nepřetržitého opakování měření.

Na čelním panelu má přístroj umístěn funkční přepínač, klávesnici a indikaci stavu. Tyto obslužné prvky umožňují nastavit přístroj tak, aby digitální údaj ukazoval přímo ve zvolených jednotkách, na které byl přístroj nakalibrován. Dále umožňují kalibraci přístroje podle etalonů

uživatelé a výpočet jednoduchých statistických údajů ze zapamatovaných hodnot. Naměřené údaje / 100 hodnot/ lze nejen uložit ale i přenést po sériové lince do Vašeho počítače.

Jednodušší typ Domena B3 není vybaven klávesnicí, přepínačem funkcí, pamětí naměřených hodnot, výstupem RS 232 a zobrazuje pouze bezrozměrná čísla .

TECHNICKÉ PARAMETRY :

Výstup paměti: Sériový RS 232

Napájení: Pb akumulátor 2 x 12V/ 2 Ah

Rozměry přístroje :300 x 230 x 150 mm

Hmotnost : 3,5 kg

VÝHODY PŘÍSTROJE :

- Sondu přístroje lze konstruovat takového tvaru, který odpovídá zkoušeným místům součástí. Standardně se dodává základní univerzální sonda s rovným snímacím čelem.
- Přístroj nepotřebuje kromě nabíjení akumulátorů žádnou údržbu.
- V přístroji je použita moderní mikroprocesorová technika, umožňující jednoduchou obsluhu a diagnostickou kontrolu.
- Použití příložené sondy dodává velkou prostorovou dostupnost měření (měření v dutinách) , klasickými metodami měření nedostupnou. Lze mapovat rozložení vlastností po součásti a vyhledat kritická místa (např. odlitku bloku válců).
- Praxí ověřená produktivita měření umožňuje 100% kontrolu i při hromadné výrobě. Měření jednoho odlitku netrvá déle než 6sec.
- Provedení B3.b usnadňuje technologovi aplikaci přístroje. Základní provedení lze použít přímo na výrobní lince, nebo na pracovišti.
- Přístroj je možno použít v soustavě SYLIT, která s ultra-zvukovým tloušťkoměrem a elektronickým posuvným pravítkem umožňuje určit velice přesně pevnost stěn složitých litinových odlitků (např. blok motoru, nově vyvinutá metoda používaná v ŠKODA LIAZ JABLONEC a.s.).

A P L I K A C E U V Á S :

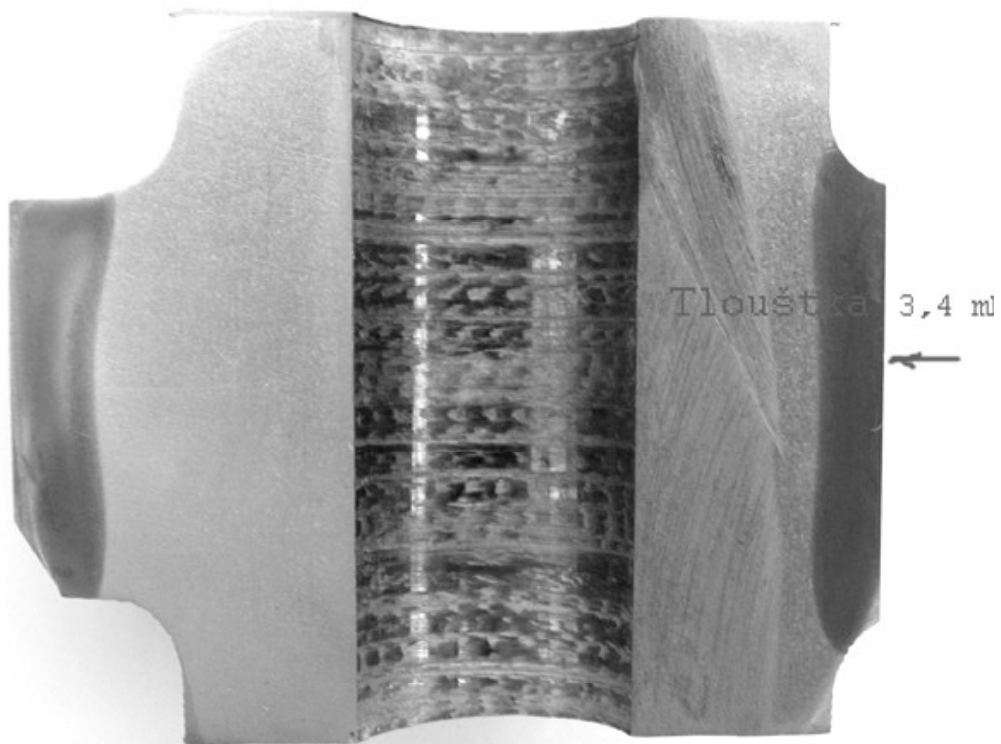
- Můžete si vyžádat nejprve (na objednání přístroje nezávazné) ověření vhodnosti této kontrolní metody na svých odlitcích.
- Dodávka přístroje DOMENA je spojena se zaškolením obsluhy na Vašem pracovišti a vypracování technologické návodky kontroly - vše v ceně přístroje.
- Záruka 1 rok

C E N A P Ř Í S T R O J E :

Domena B3 (akumulátorový přístroj, bez výstupu RS, bez klávesnice) Kč bez DPH	59 950,-
Domena B3.b DPH	69 450,- Kč bez
Domena B3.b s nabíječem akumulátorů NB -11 /3 900,- Kč/ Kč bez DPH	73 350,-

Příloha 2:

Řez vačkovou hřídelí TEDOM



Hloubka zakalení stykové plochy („palce“): ~ 4,9mm

Příloha 3:

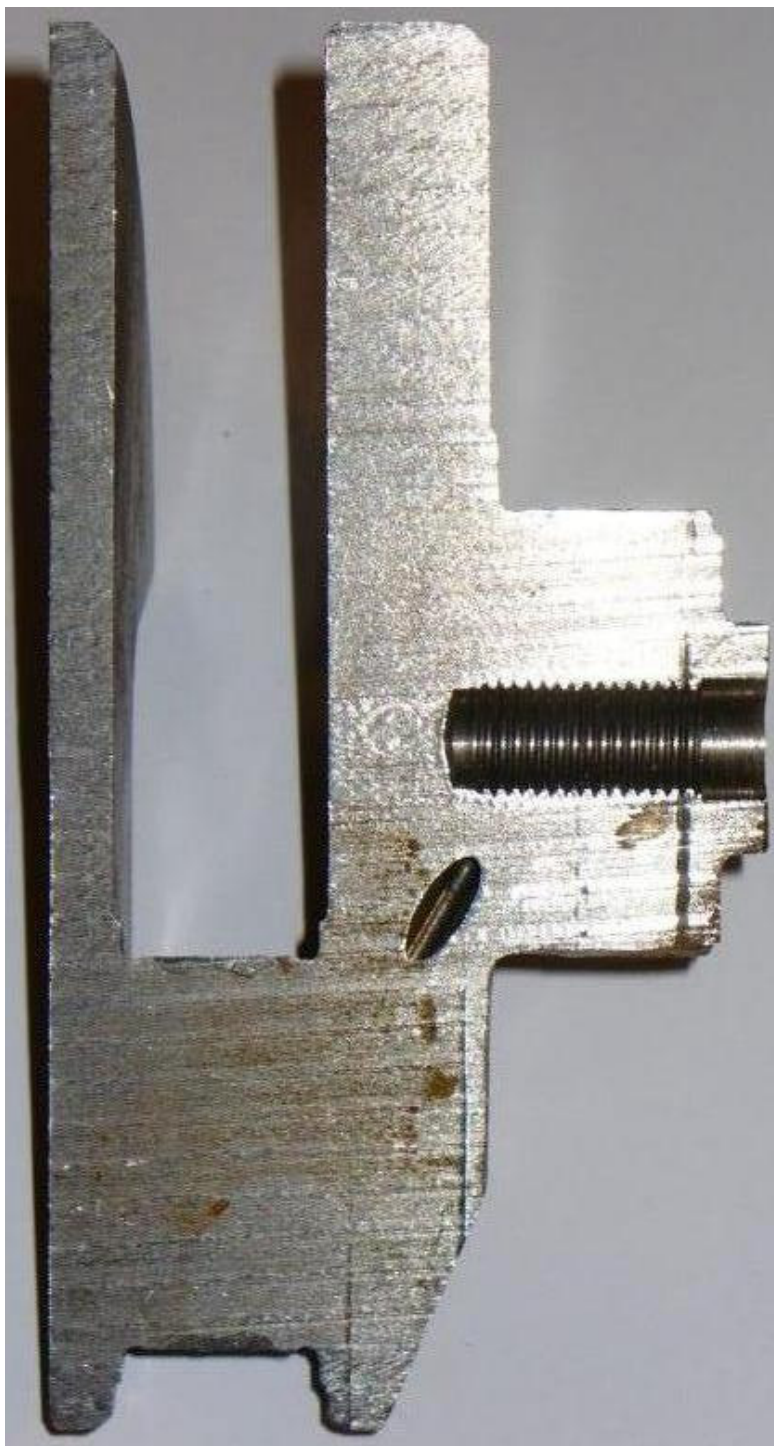
Měřicí sestava USLT 2000



Tato ultrazvuková sestava se vyrábí ve dvou provedeních. První z nich je PCMCIA karta (obrázek vlevo), kterou je možné využít ve spojení s notebookem. Z důvodu poměrně obtížné manipulovatelnosti s touto sestavou v běžném výrobním provozu se USLT 2000 vyrábí také v provedení průmyslového počítače (obrázek vpravo), který se na první pohled jeví podstatně robustněji.

Příloha 4:

Řez klikovou hřídelí Škoda:



Hloubka zakalení čepu ~ 1,9mm

Příloha 5:

Řez klikovou hřídelí nákladního automobilu TEDOM



Hloubka zakalení: ~ 5,1mm

Příloha 6:

Řez přírubovým hřídelem z automobilu Volkswagen:

Zakalený hřídel:



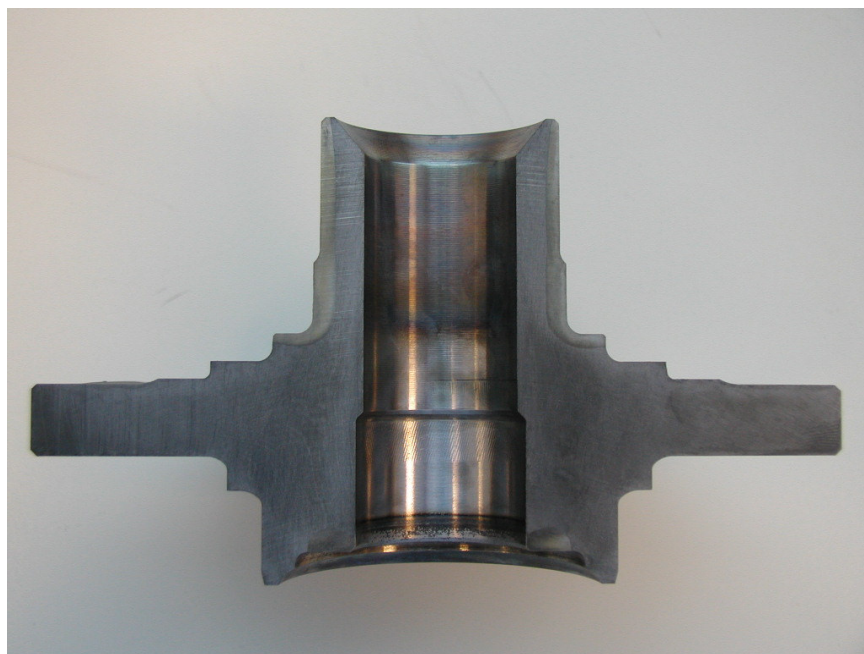
Nezakalený hřídel:



Příloha 7:

Řez nábojem kola automobilu Volkswagen:

Zakalený náboj:



Nezakalený náboj:

